



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

Estudo experimental de ancoragens de fios de aço para vigas de madeira pré-esforçadas

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Estruturas

Autor

Débora Lília Brandon Correia

Orientador

Professor Doutor João Henrique de Oliveira Negrão

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Março, 2013

AGRADECIMENTOS

Terminada mais uma etapa da minha vida, quero aqui deixar o meu sincero agradecimento a todos os que, pelo que me ensinaram ou pela amizade que têm por mim, muito contribuíram para que este momento chegasse.

Ao Professor Doutor João Henrique Negrão, orientador desta dissertação, o meu muito obrigada pelos valiosos conhecimentos que me transmitiu e pelo apoio disponibilizado ao longo do trabalho.

Aos técnicos do laboratório de estruturas Fernando Rodrigues e Luís Gaspar, ao Senhor David funcionário da oficina do DEC, pela disponibilidade e ajuda na realização do trabalho experimental.

Às empresas, Fapricela, na pessoa do Eng.º Nelson Batista, à Intralba, na pessoa do Senhor Fernando Baía, e por fim à Trecem, pelo material que gentilmente ofereceram.

A todos os meus amigos, em especial à Marta Neves, à Teresa Linhares, à Ana Pereira e à Sofia Matias pela amizade, companheirismo e por me terem dado a oportunidade de passar grandes momentos de convívio.

Por fim agradeço à minha família, em particular aos meus pais e ao meu irmão, por me terem proporcionado chegar até aqui, e acima de tudo, por aquilo que representam para mim.

RESUMO

O presente trabalho surge no seguimento de outros já elaborados, que tinham como objetivo, a aplicação de pré-esforço a elementos de madeira (vigas), na direção das fibras de forma a estas serem reforçadas e adquirirem uma melhor capacidade resistente. Serão realizados três tipos de ensaios, dois de pós-tensão e um de pré-tensão.

Nos ensaios de pós-tensão, a aplicação de pré-esforço é feita por meio de aperto de porcas nas extremidades de varões roscados. Tem como objetivo limitar a perda produzida pela recuperação elástica e pela penetração do fio na cunha de pré-esforço. Num dos ensaios o próprio aperto das porcas introduz tração no varão de aço, no outro, o aperto das porcas será feito com o fio em tensão.

No ensaio de pré-tensão, o sistema de transmissão de forças fio-madeira a utilizar será a colagem ao longo do comprimento do fio. Pretende-se definir qual o comprimento de aderência do fio e o regime de tensão instalado, recorrendo a extensómetros. Este sistema já foi testado, como tal o objetivo aqui é uma comprovação de resultados.

ABSTRACT

This research is a follow-up of others that had been done with the purpose of applying prestressing in timber beams, in fibers direction, so that they can be strengthened in order to have better resistance. It will be performed three trials: two of post-tension and one of pre-tension.

In the pre-tension trial, the forces transmission system is made by tightening nuts in both ends of the steel bars. This has an objective: to limit the loss produced by elastic recovery and by wire penetration in the prestressing wedge. In one of the trials, the own tightening of nuts introduces tension in the steel bars; in the other, the tightening of nuts will be done with the wire in tension.

In the pre-tension trial, the force transfer from the wire to the timber element is achieved by gluing the wire all along the beam length. Using extensometers we will be able to define what the adherence length of the wire is and what the tension system is. This system has already been tested; therefore it will only be done in order to verify the previous results.

INDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
INDICE.....	iv
Indice de Figuras	vi
SIMBOLOGIA	viii
ABREVIATURAS	x
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 A madeira como elemento de construção:	1
1.2 Objetivo do trabalho	2
1.3 Estrutura do trabalho:.....	3
2 ESTADO DA ARTE.....	4
2.1 Vigas de madeira reforçadas por polímeros reforçados com fibras:.....	5
2.2 Vigas de madeira reforçadas com recurso a fios de aço de alta resistência:.....	6
3 MATERIAIS	14
3.1 Madeira	14
3.2 Aço.....	17
3.3 Ligantes.....	19
3.4 Porcas sextavadas e chapas metálicas.....	20
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TRABALHO EXPERIMENTAL	22
4.1 Propriedades e características dos provetes	22
4.2 Método de aplicação de pré-esforço	23
4.2.1 Aplicação de pré-esforço por aperto de porcas- Ensaio A:	24
4.2.2 Aplicação de pré-esforço por tração do fio de aço e sucessivamente aperto de porcas- Ensaio B:	26

4.2.3	Aplicação de pré-esforço por tração do fio de aço e transferência de força pela aderência do ligante- Ensaio C:.....	28
4.3	Tensão de compressão na madeira.....	31
4.4	Encurvadura	32
4.5	Tensão tangencial ao corte.....	32
4.5.1	Interface fio de aço/ligante	33
4.5.2	Interface ligante/madeira	34
4.6	Dimensionamento das chapas de topo	35
4.7	Aplicação do pré-esforço	36
4.7.1	Perdas por deformação elástica	37
4.8	Alongamento do fio de aço e do provete de madeira.....	38
4.9	Ensaios experimentais.....	39
4.9.1	Provetes realizados segundo o ensaio A:.....	39
4.9.2	Provetes realizados segundo o ensaio B	44
4.9.3	Provetes realizados segundo o ensaio C	49
5	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	61
5.1	Diferenças entre Pós-tensão e Pré-tensão	61
5.2	Comparação dos resultados dos ensaios de Pós-tensão (Ensaio A e Ensaio B)	61
5.3	Comparação dos resultados dos ensaios de Pré-tensão (Ensaio C)	62
5.3.1	Comparação dos resultados do Provete 5 e 6	62
5.3.2	Comparação do Provete 5 e 6 com resultados da Tese de Mestrado Integrado do Cedrico Moderno.....	63
5.3.3	Comparação de resultados do Provete 7 e 8 com resultados da Tese de Mestrado Integrado do Cedrico Moderno (2011).....	63
6	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	67
	ANEXO	70
A.	Variação da tensão instalada ao longo do tempo do provete 7	70
B.	Variação da tensão instalada ao longo do tempo do provete 8	70

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1-Tabuleiro de madeira lamelada pré-esforçada transversalmente (Ritter, 1990)	4
Figura 2.2- Esquema de ensaios experimentais de arranque efetuados por Barroso (2004)	7
Figura 2.3- Representação esquemática dos provetes	9
Figura 2.4-Esquema de ensaio utilizado, Martins (2009).....	10
Figura 2.5-Esquema utilizado para aplicação do pré-esforço, por Cedrico (2011).....	11
Figura 2.6-Esquema de leitura dos valores na aplicação de pré-esforço, por Rodrigues (2011)	11
Figura 2.7-ConFiguração dos provetes de Leitão (2012)	12
Figura 3.1-Humidímetro de agulhas, para medição do teor de água nos provetes.....	16
Figura 3.2-Curva de tensão-extensão para madeira solicitada e, tração e compressão (Dias, (2009/2010)	17
Figura 3.3- Resultados do ensaio de tração do aço.....	18
Figura 3.4- Cola utilizada para a colagem das lamelas (Icosit KC220N)	19
Figura 3.5-Cola utilizada para aderir o fio de aço pré-esforçado à madeira no ensaio de pré- tensão (Sikadur 30 Normal).....	20
Figura 3.6-Porcas sextavadas e chapa metálica, utilizadas no ensaio de pós-tensão	21
Figura 4.1-Tipos de Provetes.....	23
Figura 4.2-Ensaio na máquina universal de tração/ compressão de 200kN	24
Figura 4.3-Esquema do ensaio A.....	25
Figura 4.4-Esquema de ensaio B	26
Figura 4.5- Ligação entre os dois provetes.....	27
Figura 4.6 - Provetes independentes um do outro	27
Figura 4.7-Esquema de ensaio C	28
Figura 4.8- Fio de pré-esforço	29
Figura 4.9-Lamela de madeira com Sikadur 30N.....	29
Figura 4.10-Secção transversal do provete.....	30
Figura 4.11- Extensómetro instalado no fio de aço	39
Figura 4.12-Esquema de ensaio.....	40
Figura 4.13-Rotura do varão.....	40
Figura 4.14-Relação entre a tensão e a extensão no aço na secção reduzida	41

Figura 4.15-Varição da tensão instalada no aço ao longo do tempo	42
Figura 4.16- Relação entre a tensão e a força instaladas no aço	43
Figura 4.17-Varição da tensão instalada ao longo do tempo	43
Figura 4.18- Esquema de ensaio	44
Figura 4.19-Varição da força antes da libertação do macaco hidráulico, referente ao provete 3	45
Figura 4.20-Varição da força antes da libertação do macaco hidráulico, referente ao provete 4	45
Figura 4.21-Fase de descarga da força nos dois provetes.....	46
Figura 4.22-Varição da tensão instalada no aço ao longo do tempo	47
Figura 4.23-Varição da tensão instalada ao longo do tempo	48
Figura 4.24- Esquema final do ensaio	49
Figura 4.25- Fase de descarga da força	50
Figura 4.26-Varição da tensão ao longo do tempo	51
Figura 4.27-Fase de descarga da força	52
Figura 4.28-Varição da tensão ao longo do tempo	53
Figura 4.29- Extensómetros no fio de aço	54
Figura 4.30- Passagem dos fios do extensómetro	54
Figura 4.31-Resultado do ensaio	55
Figura 4.32- Varição da tensão ao longo do tempo	56
Figura 4.33-Extensómetros no fio de aço	57
Figura 4.34-Resultados do ensaio.....	57
Figura 4.35-Varição da tensão ao longo do tempo	59
Figura A – Varição da tensão ao longo do tempo aos 24 cm.....	70
Figura B – Varição da tensão ao longo do tempo aos 40 cm.....	70

SIMBOLOGIA

- A - Área de contacto para a transmissão da força
 A_{chapa} – Área da chapa de aço
 A_s – Área da secção transversal do aço
 A_w – Área da secção transversal da madeira
 bw – Largura da secção da madeira
 d_{ext} – Diâmetro externo
 d_{int} – Diâmetro interno
 dm - Menor diâmetro médio da porca
 E_s – Módulo de elasticidade do aço
 E_w – Módulo de elasticidade da madeira
 $E_{o,g}$ – Módulo de elasticidade da madeira
 $f_{c,0}$ – Tensão de resistência à compressão na direção das fibras da madeira;
 f_y – Tensão de cedência do aço
 F - Força instalada no aço
 F_S^i – Força aplicada no aço
 F_S^f – Força final instalada no aço
 $f_{t,90}$ – Tensão de resistência à tração na perpendicular das fibras da madeira
 $f_{v,d}$ – Tensão de resistência ao corte
 F_w – Força instalada na madeira
 f_u – Tensão ultima de rotura da chapa;
 hw – Altura da secção da madeira
 L – Comprimento onde se encontra o extensómetro
 $l_{trans,força}$ – Comprimento de transferência da força
 N_{ed} – Força de compressão atuante
 $N_{c,rd}$ – Esforço normal resistente à compressão
 p - Perímetro
 P - Força de pré-esforço aplicada
 p_{ext} – Perímetro externo;
 t_p - Espessura da chapa
 w – Teor de água
- $\beta_{p,rd}$ – Valor de cálculo da resistência ao punçoamento
 Δl_s – Alongamento do aço
 Δl_w – Alongamento da madeira
 γ_{M2} – Coeficiente parcial de segurança
 ε_s^i – Extensão inicial no fio de aço

ε_s^f – Extensão final no fio de aço
 ε_w – Extensão no provete de madeira
 $\sigma_{c,0}$ – Tensão de compressão na direção longitudinal
 σ_s^i – Tensão inicial no fio de aço
 σ_s^f – Tensão final no fio de aço
 σ_w – Tensão de compressão no provete de madeira
 τ_d – Tensão tangencial ao corte aplicada

ABREVIATURAS

CEN - Comitê European de Normalisation
CFRP – Polímeros reforçados com fibras de carbono
DEC – Departamento de Engenharia Civil
EC – Eurocódigo
EN – Euro Norm
Ext – Extensómetro
FRP – Polímeros reforçados com fibras
GFRP – Polímeros reforçados com fibras de vidro
IPQ – Instituto Português de qualidade
NP – Norma Portuguesa

1 INTRODUÇÃO

1.1 A madeira como elemento de construção:

A madeira foi durante vários anos, nomeadamente até ao final do século XIX, um dos materiais mais utilizados, não só devido à sua abundância, mas também à sua fácil trabalhabilidade. Contudo o aparecimento de novos materiais, no século XX, e o seu estudo aprofundado, originou um desenvolvimento tecnológico, levando a construção civil a centralizar-se no betão e no aço. Assim a madeira ficou praticamente só com funções estruturais.

Os principais constituintes da madeira são a celulose, a hemicelulose, a lenhina e os sais minerais. Caracteriza-se por ter elevada anisotropia, resultante da forma e orientação das células e da estação de crescimento. Em função da espécie de árvores da qual é oriunda (folhosa ou resinosa) vai apresentar diferentes características tanto na sua constituição como nas suas propriedades químicas e mecânicas. Relativamente à durabilidade, verifica-se que nos últimos anos tem aumentado bastante, graças à aplicação de produtos químicos. A madeira apresenta ainda boa resistência ao fogo, funciona como bom isolador térmico, acústico e elétrico, e consegue absorver algumas vibrações. Relativamente à estética é bastante apreciada, devido à sua textura e cor.

Contudo, no final do século XX, e devido à falta de competitividade da madeira frente ao betão e ao aço, algumas organizações de investigação começaram a investigar profundamente a madeira, o que levou ao conhecimento pormenorizado das suas características, bem como à criação de normas para a sua classificação. Estes estudos deram ainda origem ao aparecimento de colas e resinas capazes de juntar vários elementos de madeira, conseguindo-se assim a criação de peças com o tamanho e forma pretendidos.

Recentemente, devido a tecnologias de produção capazes de garantir maior homogeneidade e melhor caracterização física e mecânica, verificou-se o aparecimento de produtos estruturais derivados da madeira, como por exemplo, a madeira lamelada colada, a madeira micro lamelada colada ou até mesmo a madeira lamelada cruzada, que vieram dar um novo impulso à madeira.

Hoje em dia a vantagem mais importante da madeira reside no facto de ser um material de construção natural e renovável, o que garante a sua existência em abundância. Tem ainda as vantagens de necessitar de pouca energia para a sua transformação, e de poder ser reaproveitada de edifícios degradados ou demolidos, por compostagem ou em produtos derivados.

Segundo Dias et al (2009), a intervenção de reforços em estruturas de madeira, poderá ser necessária por diversos motivos, sendo a mais frequente a insuficiência da resistência e/ou rigidez desses elementos, face a uma verificação de segurança estrutural segundo os critérios atuais, imposta, designadamente por uma alteração de uso ou por alteração de critérios atuais de dimensionamento, que são mais exigentes comparativamente ao que eram há vários anos atrás. Deformações acentuadas ou pavimentos com frequências de vibração demasiado baixas são também deficiências comuns em estruturas antigas que poderão necessitar de correções, até por razões de conforto para utilizadores. O reforço também pode ser necessário em resultado de perda de secção transversal dos elementos causado pelo ataque de carunchos, ou devido à sua eventual rotura mecânica.

1.2 Objetivo do trabalho

O presente trabalho tem como objetivo principal explorar diferentes métodos de aplicação de pré-esforço, pós-tensão e pré-tensão, e explorar a possibilidade e limitações de sistemas alternativos de ancoragem para fios de aço usados como armaduras de pré-esforço em vigas de madeira.

A aplicação de pré-esforço tem como objetivo a introdução de um estado prévio de tensões, numa estrutura, de modo a melhorar a sua resistência ou comportamento, sob a ação de diversas condições de carga. No sistema de ancoragem mecânica, estuda-se a viabilidade de um sistema de ancoragem baseado em aperto de porcas, como forma de limitar a perda produzida pela recuperação elástica e pela penetração da cunha de ancoragem no fio, quando se trata de um elemento de pequeno comprimento. O aperto das porcas será feito com o fio em tensão e, em alternativa, será o próprio aperto a introduzir tração no fio de aço. De forma semelhante será realizado um ensaio, onde se pretende testar a possibilidade da produção destes elementos em série. Este sistema a funcionar permite a aplicação de pré-esforço corretivo, após a entrada em serviço da viga (Pós-tensão). No sistema de ancoragem por aderência, procura-se definir o comprimento de aderência do fio e o regime de tensão instalado, colocando extensómetros ao longo do comprimento da zona colada ou apenas um no meio para controlar a tensão. Este sistema de aplicação de pré-esforço será para comparar os resultados obtidos com resultados experimentais recolhidos em trabalhos anteriores.

1.3 Estrutura do trabalho:

Este trabalho tem uma forte componente experimental e pode ser dividido em três partes que englobam um total de seis capítulos.

A primeira parte é formada pelos dois primeiros capítulos. No Capítulo 1 faz-se um enquadramento e revelam-se os objetivos a que se propõe. No Capítulo 2, (Estado de arte) apresentam-se alguns estudos já efetuados acerca da possibilidade de aplicação de pré-esforço à madeira, estudos estes que servem de base para o presente trabalho.

A segunda parte integra três capítulos. O Capítulo 3 consiste na apresentação dos materiais utilizados neste trabalho. No Capítulo 4 podem ser identificadas duas partes: numa primeira parte é apresentada a influência de alguns parâmetros, e o estudo de efeitos, como as perdas para recuperação elástica da madeira. Numa segunda parte é descrita a produção dos provetes, o esquema e o procedimento dos ensaios, bem como os resultados obtidos. O Capítulo 5, centra-se na comparação de resultados obtidos, entre os ensaios realizados, e com resultados obtidos noutros trabalhos experimentais realizados anteriormente

A terceira parte, o Capítulo 6, reúne as conclusões apuradas nos ensaios experimentais e propõe temas para desenvolvimentos futuros baseados neste trabalho bem como trabalhos precedentes.

2 ESTADO DA ARTE

Como foi referido anteriormente, este trabalho pretende dar uma maior visibilidade sobre a possibilidade de aplicação de pré-esforço em vigas de madeira com recurso a fios de aço de alta resistência, tendo como referência trabalhos já realizados por investigadores com o objetivo de procurar soluções para o reforço de vigas de madeira.

A aplicação de vigas de madeira pré-esforçadas tem como princípio inspirador o das vigotas de betão pré-esforçadas. Em que o pré-esforço, produz um estado de tensão autoequilibrado internamente, pelo qual a peça fica sujeita a esforços, de flexão principalmente, de sentido oposto ao que tenderá a ser-lhe introduzido pelo carregamento externo (peso próprio e carga útil)

A aplicação de pré-esforço transversal em tabuleiros de pontes de madeira é já uma prática comum em alguns países. Estes tabuleiros são constituídos pela sobreposição de lamelas de madeira maciça, que são unidas entre si através da utilização de varões pré-forçados de aço, (Figura 2.1) Esta técnica surgiu no Canadá em 1976, motivada pela necessidade de reabilitar pontes de madeira, e a união entre lamelas era feita com pregos mas no entanto não era uma solução muito aceitável visto que ganhava folgas inadmissíveis, sendo isto concluído por Ritter et al (1990). No entanto é de salientar, que este tipo de sistema de aplicação de pré-esforço é diferente do que se vai analisar, visto que se trata de pré-esforço transversal, destinando-se a conferir um comportamento bidimensional a um sistema que, sem ele, seria apenas um sistema de tábuas independentes justapostas.



Figura 2.1-Tabuleiro de madeira lamelada pré-esforçada transversalmente (Ritter, 1990)

Bohannan (1974) realizou estudos em madeira pré-esforçada para avaliação dos efeitos de fluência (aumento da deformação para um nível constante de carga - a deformação diferida no tempo é, dependendo do material (não nas estruturas metálicas) muito superior à deformação instantânea) para vigas de madeira pré-esforçada sem pré-esforço sujeitas à flexão e em regime elástico, durante 8 anos. Ao fim desse tempo procedeu ao ensaio de flexão, até à rotura da viga, medindo no final através de células de carga, o valor de pré-esforço recuperado no aço. Os resultados mostram que o pré-esforço perdido foi inferior a 5%, o que mostra bom desempenho deste tipo de elemento.

2.1 Vigas de madeira reforçadas por polímeros reforçados com fibras:

O reforço de vigas de madeira pela utilização de polímeros reforçados com fibras (FRP) é uma prática que vem sendo utilizada e estudada por vários investigadores, sendo umas das técnicas de reforço ou consolidação mais interessantes e promissoras, dada a rapidez e carácter pouco intrusivo do processo, que permite a manutenção das estruturas em serviço com o mínimo de substituição da estrutura original. As mais utilizadas são:

- Polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP);
- Polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP);
- fibras de Aramida;
- Kevlar®

Galloway et al (1996) realizaram uma investigação onde estabeleceram um procedimento para reforçar vigas de madeira lamelada colada, com e sem aplicação de pré-esforço. Foi utilizada uma fibra sintética muito resistente e leve (Kevlar), colocada entre lamelas na zona tracionada das vigas. Neste estudo, além de fazerem uma análise comparativa entre valores da resistência e rigidez das vigas reforçadas e das vigas não reforçadas, analisaram também o efeito de fluência nas perdas diferidas da força de pré-esforço e a resistência da colagem do FRP à madeira através de ensaios de corte. Os resultados obtidos não atingiram os esperados: para além da perda do pré-esforço, a rotura acontece, de uma forma geral, na zona dos nós e “*finger joints*” da lamela tracionada. De qualquer modo, permite concluir que a aplicação de pré-esforço aumentou a resistência das vigas.

Buell e Saadatmanesh (2005) desenvolveram um projeto onde se demonstra como os materiais compósitos avançados podem ser utilizados para reforçar vigas de madeira em pontes já existentes. O principal objetivo deste projeto foi determinar o aumento da rigidez, a resistência á flexão, e ao corte das vigas, caso fossem envolvidas as vigas de madeira com um

tecido de carbono. Foi então concluído que a aplicação do tecido de carbono faz aumentar a rigidez (17% a 20%), faz aumentar a resistência á flexão (40% a 50%) e o aumento da resistência ao corte (36% a 68%).

Dias et al (2006) estudaram o reforço à flexão com compósitos de fibras de carbono (CFRP) em vigas de madeira lamelada colada. Foram utilizados dois sistemas, o curado “in situ” (manta) e o pré-fabricado (laminado). Foi variada a posição dos reforços nas vigas, para avaliar e comparar a resistência e o desempenho dos elementos estruturais à flexão, comparando com vigas não reforçadas. Foi concluído que a viga reforçada teve um aumento de módulo de elasticidade, de carga máxima e da respectiva flexão a meio vão, comparativamente com a viga de referência.

Kim e Kent (2010) realizaram uma investigação com o objetivo de avaliar o comportamento de vigas de madeira reforçadas com fibras de carbono. Este trabalho apresentou uma abordagem de como prever a flexão das vigas reforçadas com compósitos de CFRP, e foi feita uma comparação com resultados experimentais. Este modelo vai avaliar a relação carga-deslocamento, o desenvolvimento da tensão e a sua concentração e as falhas que podem acontecer nas vigas reforçadas por CFRP. Os modelos que apresentaram melhores resultados foram utilizados num estudo paramétrico, no qual foi avaliado o efeito do CFRP em várias espécies de madeira. Por fim, foi concluído que existem dois modos de rotura, uma por esmagamento da madeira numa zona onde a flexão apresentada é crítica e na extremidade da zona de amarração dos laminados, onde ocorreu concentração das tensões.

2.2 Vigas de madeira reforçadas com recurso a fios de aço de alta resistência:

Atualmente um dos estudos também realizados para o reforço de vigas de madeira é a utilização de pré-esforço com o recurso a fios de aço de alta resistência, devido à possibilidade de redução de deformações em serviço, ao aumento da ductilidade das vigas uma vez que a aplicação do pré-esforço retarda a rotura das fibras tracionadas. Sendo isto justificado porque a força autoequilibra o estado de tensão da peça internamente, principalmente causado pela flexão causada pelos esforço externos. O custo é comparativamente baixo do fio de pré-esforço, relativamente a fibras de carbono ou Kevlar, que apresentam desempenho comparável.

Barroso et al (2004) avaliaram o comportamento de vigas de madeira lamelada pré-esforçadas, realizando um estudo analítico sobre o comportamento em flexão, com recurso de fios de aço de alta resistência, testando a sua aderência à madeira através de ensaios de

arranque (Figura 2.2), fazendo variar o comportamento de colagem e o tipo de resina utilizada para a aderência do fio de pré-esforço em dois estado distintos (limpo com diluente e celuloso e em estado original, após sair da trefilaria). Os resultados mostraram que a rotura se deu em todos os casos, na interface varão/resina e o valor médio da tensão “aparente” de aderência é baixo e aproximadamente igual para ambos os tipos de resina, mostrando o papel fundamental da limpeza e desengorduramento do fio de pré-esforço.

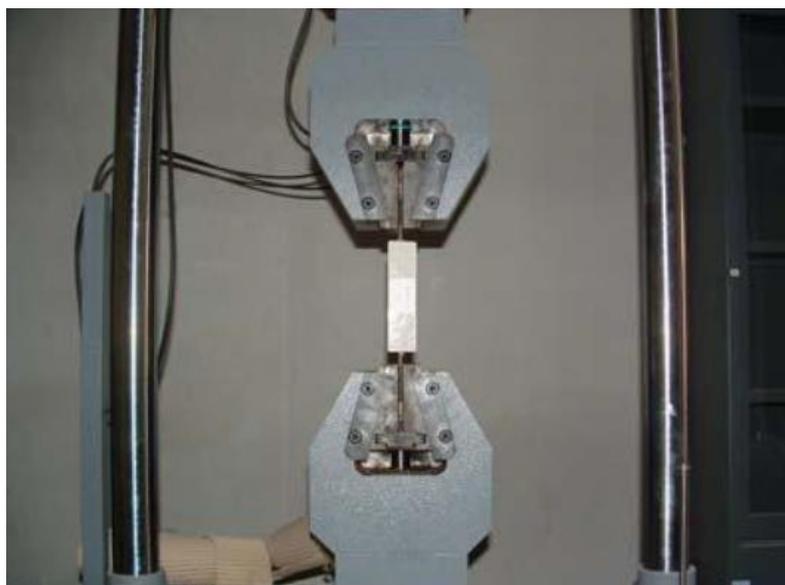


Figura 2.2- Esquema de ensaios experimentais de arranque efetuados por Barroso (2004)

De Lucas e Marano (2011) investigaram o reforço e pré-esforço de vigas de madeira lamelada colada, com recurso a varões de aço. Estes varões de aço foram localizados na parte inferior e parte superior das vigas, aumentando a sua capacidade de carga e a rigidez. Foi realizada uma série de quatro ensaios que revelou claramente ganhos de resistência superiores a 40%, tal como o aumento da ductilidade das vigas. Os resultados mostraram que os varões de aço podem ser utilizados para o aumento da resistência à flexão das vigas de madeira.

Borri e Corradi (2011) realizaram um estudo experimental sobre o reforço de vigas de madeira, sob efeito de cargas de flexão, com recurso a cordões de aço de alta resistência, com o intuito de avaliar a sua resistência à flexão. O trabalho experimental baseou-se na realização de um ensaio de flexão em quatro pontos diferentes, tendo-se medido a ductilidade e a rigidez. Foi concluído que no geral, o comportamento dos elementos de madeira reforçada aumenta significativamente a capacidade de carga e a ductilidade. Em alguns casos, houve aumentos de mais do que 100% da carga máxima, em comparação com as vigas não reforçadas. Esta

técnica é económica e eficaz e pode ser uma alternativa interessante ao uso das fibras de carbono ou a outros métodos dispendiosos.

Em trabalho precursores do presente, desenvolveram-se estudos relativamente a vários métodos para aplicação de pré-esforço em vigas de madeira, quer com recurso a laminados de fibras de carbono, quer com fios de aço de alta resistência.

Balseiro (2007) realizou um estudo que se centra na reparação de vigas carregadas à flexão, que eventualmente apresentam rotura por fendas de flexão, que envolvem colagem do reforço na fase tracionada. Balseiro, tentou desenvolver uma técnica de reforço, que consumisse o mínimo de tempo e de recursos, para esse efeito usou polímeros reforçados com fibras de carbono que foram colados, com e sem pré-esforço, a vigas de madeira lamelada colada com resina epoxídica. Este sistema de reabilitação, consiste na imposição de uma contra-flecha à viga recorrendo a escoras induzindo deformações nas vigas, enquanto escorada, na colagem de um laminado de CFRP, sendo retiradas as escoras após a cura da cola. Concluiu que os laminados de fibras de carbono apresentam uma resistência à tração bastante superior à do aço de pré-esforço, no entanto, como o seu módulo de elasticidade é da mesma ordem de grandeza, o seu contributo para o aumento da resistência da viga é semelhante. Por fim foi concluído, que o pré-esforço aplicado por intermédio da colagem do laminado na face comprimida de uma viga previamente fletida, permitiu obter um aumento da ordem de 26% no momento último da secção, Contudo, nas vigas em que a colagem foi feita “em repouso”, portanto sem pré-esforço, o aumento também foi cerca de 19%.

Simões (2008) realizou um estudo sobre a aderência do fio de pré-esforço e a madeira, no qual era necessário garantir a transmissão de tensões de aderência entre os materiais. Este trabalho tinha como objetivo o estudo do ligante que dá melhor garantias. O trabalho consistia em preparar vários provetes prismáticos de madeira, furados longitudinalmente, onde foi inserido fio de aço de pré-esforço e o ligante, aplicados em diferentes condições de humidade da madeira, profundidade e diâmetro de furos e de pré-esforço. A Figura 2.3 representa os provetes utilizados.

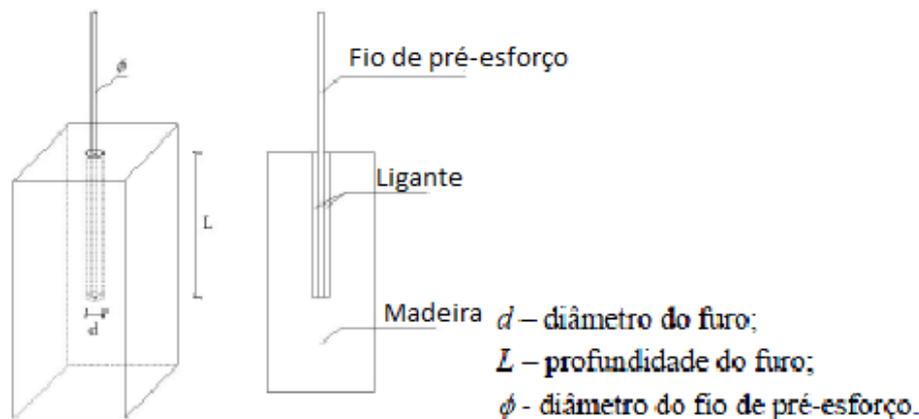


Figura 2.3- Representação esquemática dos provetes

De entre vários tipos de ligantes: resina epóxi (com e sem adição de cargas), resinas alternativas e argamassa de cimento, destacou-se o ligante Icosit KC220/60, com melhores resultados, em cerca de 90% dos provetes a rotura ocorreu entre fio/ligante e nos restantes 10% na interface ligante/madeira, dizendo esses 10% respeito ao ligante argamassa de cimento. Em relação à Icosit K 101, foi concluído que pode ser uma boa solução, visto que não é influenciado pela variação do teor de água, mas subsistiram dúvidas em relação ao comprimento de colagem e à utilização ou não de cargas. Aumentando a profundidade do furo para o dobro, apesar de ter um ganho de 20% na força de arranque, existiu um decréscimo de 40% nas tensões de aderência. O aumento do diâmetro dos furos (1mm) implicou uma força de arranque e, conseqüentemente, uma tensão de aderência na interface ligante/madeira superior 44% e um aumento de 15% na tensão de aderência na interface aço/ligante.

Martins (2009) complementou os estudos de Balseiro (2007), com uma forte componente experimental, mas em vez do laminado CFRP, foi colada uma chapa de aço de 3mm de espessura, e usou-se uma resina epoxídica Icosit K101, da Sika, como ligante. Obteve um ganho de 16%. Além deste resultado, também foi apurado um ganho médio de cerca de 32% em vigas pré-esforçadas por pós-tensão e outro, de 41%, sendo usado uma percentagem de aço maior, colados com a mesma resina epoxídica. Na Figura 2.4 pode-se observar o esquema de ensaio utilizado por Martins.



Figura 2.4-Esquema de ensaio utilizado, Martins (2009)

Moderno (2011) realizou um estudo experimental com o objetivo de reforçar vigas de madeira por aplicação de pré-esforço por pré-tensão, com fios de aço. A metodologia consistiu na aplicação de um pré -tensão aos fios, (Figura 2.5), sendo depois colados os elementos de madeira com um ligante e, após a cura, libertado fio de aço da sua ancoragem mecânica. O estudo fixou-se no problema de aderência do fio de aço pré-esforçado aos elementos de madeira. Para aplicação de pré-esforço no aço foi utilizado um macaco hidráulico, em que este trabalhava em duas cantoneiras de aço fixas numa viga metálica. Os ligantes utilizados foram o Sikadur 30 Normal, Icosit KC220N, Purbound VN3010 e Icosit K101, tendo-se concluído pelo bom desempenho da cola Sikadur 30 Normal, apresentando perdas de pré-esforço reduzida.



Figura 2.5-Esquema utilizado para aplicação do pré-esforço, por Cedrico (2011)

No presente trabalho, tem-se como um dos objetivos a verificação dos resultados de Moderno.

Rodrigues (2011) realizou um estudo experimental com o objetivo de aplicação de pré-esforço a elementos de madeira por pré-tensão, por meio de porcas e fios de aço roscados. Efetuou estudos analíticos e paramétricos para obter um conhecimento deste sistema estrutural. Produziu depois provetes de elementos de vigas nos quais foi aplicada a força de pré-esforço, tendo-se posteriormente ensaiados à flexão até à rotura e comparado valores obtidos com os valores teóricos previstos. Foi concluído que a aplicação de pré-esforço através de uma força de aperto de roscas nas extremidades dos fios de aço, constitui uma alternativa viável e vantajosa, na medida em que são reduzidas as perdas instantânea. A introdução de pré-esforço em vigas de madeira mostrou ganhos de resistência do elemento através do aumento da carga última de rotura, apresentam deformações menores relativamente às vigas não reforçadas. A Figura 2.6 mostra o esquema de leitura dos valores.



Figura 2.6-Esquema de leitura dos valores na aplicação de pré-esforço, por Rodrigues (2011)

Barroso (2012) realizou um estudo sobre investigações já existentes, essencialmente experimental através da análise de comportamento de vigas de madeira pré-esforçadas, em modelos numéricos de elementos finitos, recorrendo ao programa Abaqus. Foram realizados diversos modelos de elementos finitos, com os quais se analisou a influência da anisotropia da madeira e a diferença entre a pós-tensão e a pré-tensão no comportamento global das vigas, as tensões que se geram na zona de ancoragem (em pós tensão, com fios não aderentes) e o comprimento de ancoragem dos fios (em pré tensão, com fios aderentes). Foi também avaliado o impacto provocado pela alteração da excentricidade e da intensidade da força de pré-esforço, bem como pela utilização de diferentes percentagens de aço na secção transversal. Ambas as possibilidades conduziram a aumentos semelhantes da resistência última, pelo que o autor concluiu que a escolha de um ou outro deve ter em conta outras variáveis.

Leitão (2012) realizou uma investigação com o objetivo de averiguar a viabilidade do uso de chapas de aço coladas para reforço de estruturas de madeira. A sua componente experimental baseou-se no estudo do comportamento e resistência de provetes colados de madeira e aço, com variações ao nível do comprimento/área de colagem, usando resina epoxídica (Figura 2.7). Foram efetuados ensaios de tração em provetes de pequena dimensão e foi avaliada a resistência da ligação. Após os ensaios realizados, verificou-se que a rotura dos provetes se deu essencialmente de três formas diferentes: rotura pela interface cola-aço e cola madeira e corte pela superfície de madeira, sendo o primeiro modo de rotura mais predominante. Da análise dos resultados experimentais concluiu-se que a área de colagem tem influência na resistência final das peças, verificando-se que à medida que se aumentava o comprimento de colagem a tensão média final diminuía.

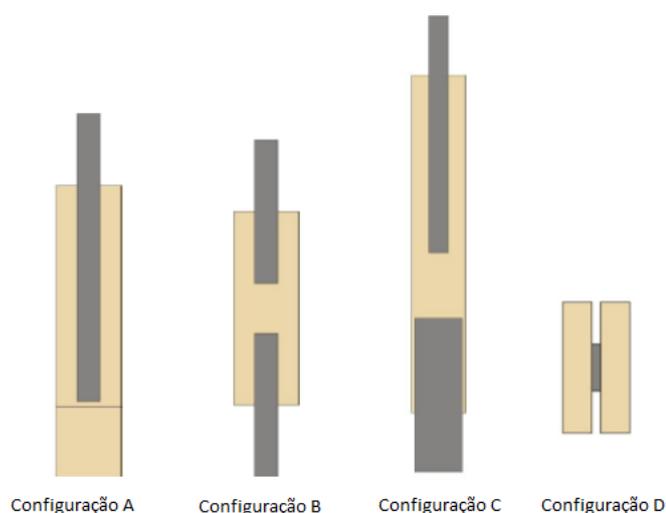


Figura 2.7-ConFiguração dos provetes de Leitão (2012)

Resumidamente, hoje em dia já existe investigação suficiente para se poder admitir que a técnica de pré-esforço poder ser aplicada em vigas de madeira com sucesso, no sentido de as tornar mais resistentes e com maior ductilidade. Podem ser utilizados diversos FRP's, mas também fios comuns de aço de elevada resistência. A força de pré-esforço pode ser aplicada tanto por pós-tensão ou por pré-tensão, visto que já são conhecidos produtos com capacidade de colar os fios de pré-esforço à madeira com eficácia. No entanto não existem ainda métodos de cálculos onde se possa estimar com rigor os ganhos expectáveis, bem como a força a ser aplicada e a sua excentricidade.

3 MATERIAIS

Para a realização dos provetes do trabalho experimental, no qual se testaram diversos métodos de aplicação de pré-esforço, foram utilizados vários materiais.

Nos ensaios de pós-tensão, os provetes foram realizados com duas lamelas de madeira coladas entre si e fio de aço de alta resistência centrado, mas “solto”.

Nos ensaios de pré-tensão, os provetes foram constituídos por duas lamelas de madeira e um fio de aço pré-esforçado contido no seu interior, centrado e envolvido por um ligante com o objetivo de o tornar aderente à madeira.

3.1 Madeira

A madeira utilizada é de Pinho Bravo, tratando-se esta de madeira maciça, pelo menos até à colagem. Depois da colagem já não se pode considerar como tal, mas também não correspondem a nenhuma classe normalizada de madeira lamelada colada (glulam). A razão para isto é que estes métodos são vocacionados para a utilização em glulam mas, como não existem meios de produzir este material, nem serrações que o pudessem fazer de forma correta, optou-se por colar tábuas com resina epóxi, porque não era a madeira a ser testada mas sim a técnica de pré-esforço.

As propriedades mais relevantes para este trabalho são, o módulo de elasticidade, para se poder prever o encurtamento elástico causado pela compressão, e por este motivo, a resistência à compressão. A resistência à tração transversal também seria relevante, para avaliar se a zona das ancoragens não fraturavam, mas esse estudo não foi feito em pormenor. A norma NP4305 é uma ficha que reúne informações sobre as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade, bem como aspetos relativos à especificação de Pinho Bravo, relevantes. Após uma avaliação um pouco conservativa das tábuas classificou-se a madeira como classe de qualidade EE, apresenta-se os valores das propriedades mecânicas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1-Valores das propriedades mecânicas da madeira de Pinho Bravo, segundo a NP4305

Classe EE Valores Característicos			
R.Tração	$f_{t,90,g,k}$	0,49	MPa
R. Compressão	$f_{c,0,g,k}$	24,7	MPa
R. Corte	$f_{v,g,k}$	3,4	MPa
M. Elasticidade	$E_{0,g,mean}$	14	GPa

A classe de qualidade referida em cima, não têm uma correspondência formalizada com a norma EN338, embora as suas propriedades se aproximam às da C35.

Para cálculos teóricos utilizaram-se valores médios, que se aproximam mais dos reais e que foram determinados a partir dos característicos, multiplicando-se estes por um fator de 4/3, correspondente à admissão de um coeficiente variação de 25% como é assumido por vários autores (Brunner et al., 2006). Os valores médios das propriedades mecânicas da madeira, relevantes para este estudo, são então apresentados no Quadro 3.2. Para o módulo de elasticidade foi usado o valor médio indicado na NP4305 para a Classe de Qualidade EE.

Quadro 3.2-Valores médios da madeira de pinho bravo

Classe EE Valores médios			
R.Tração	$f_{t,90,g,mean}$	0,65	MPa
R. Compressão	$f_{c,0,g,mean}$	32,9	MPa
R. Corte	$f_{v,g,mean}$	4,53	MPa

O teor de água não é uma propriedade característica da madeira, mas tem uma grande influência nas suas capacidades resistentes, dependendo das condições higrotérmicas do meio em que a madeira se encontra, nomeadamente a temperatura e a humidade relativa do ar. A madeira deve ter um teor de água compatível com a colagem, geralmente cerca de 12%. Valores muito inferiores não são correntes em condições normais de exposição, e valores muito superiores podem tornar ineficaz a colagem. Há também que minimizar as variações dimensionais após a realização do trabalho.

Foi então conveniente medir o teor de água em todos os provetes. Para isso, recorreu-se ao humidímetro de agulhas. Na Figura 3.1 ilustra-se a utilização do aparelho.



Figura 3.1-Humidímetro de agulhas, para medição do teor de água nos provetes

O valor do teor de água varia ligeiramente consoante o lado do provete em que seja feita a medição, no entanto foi feita uma média de valores retirados em três pontos. Pode ser visualizado no Quadro 3.3 o valor médio do teor de água de cada provete a ser utilizado.

Quadro 3.3-Teor de água dos provetes

Provete	w (%)
1	11,2
2	11,2
3	10,3
4	9
5	11,3
6	10,3
7	11,2
8	10,9

É importante referir e descrever o comportamento reológico da madeira quando sujeito a tensões. Na Figura 3.2 está representado graficamente a relação entre a tensão e a extensão para este material.

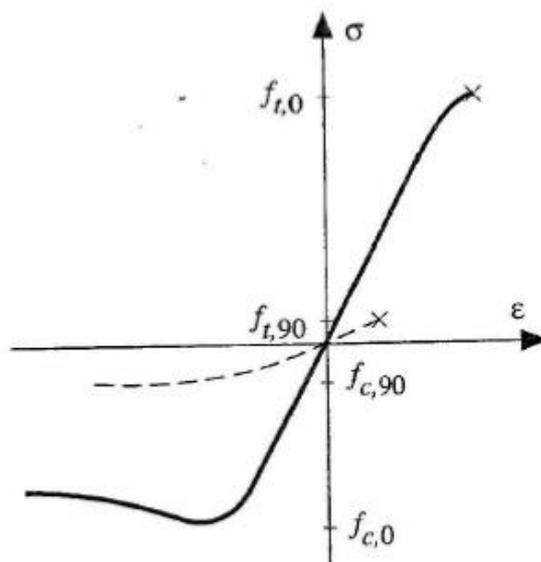


Figura 3.2-Curva de tensão-extensão para madeira solicitada e, tração e compressão (Dias, (2009/2010))

Pela análise do gráfico da Figura 3.2, pode concluir-se que o comportamento da madeira em tração é diferente do comportamento à compressão. Quando sujeita a tensões de tração, paralela às fibras, a madeira apresenta comportamento linear até à rotura, tendo esta uma rotura frágil quando atinge a tensão limite de tração. Quando sujeita a compressão, tem um comportamento dúctil semelhante a um modelo constitutivo elasto-plástico, embora não exatamente igual, as fibras não plastificam, mas instabilizam, sendo tipicamente visíveis linhas de esmagamento aproximadamente perpendiculares ao fio. Este tipo de comportamento resulta numa significativa capacidade de deformação “plástica” em compressão.

3.2 Aço

Foram utilizados fios de aço de dois tipos:

Nos dois ensaios de pós-tensão foi utilizado um varão com diâmetro de 12 mm. Inicialmente era previsto usar fios de pré-esforço de 6mm ou 8mm, mas visto serem aços duros, iria ser necessário maquinar as roscas nos fios de pré-esforço. Isso requeria pastilhas de aço endurecido especial, uma vez que nas proximidades estas não eram possíveis de adquirir, optou-se por um varão de 12 mm de um aço menos duro, com uma superfície lisa, que permitisse a maquinagem de roscas com pastilhas normais. Para os ensaios de pré-tensão foi utilizado um fio de pré-esforço com diâmetro de 6mm com uma superfície ligeiramente indentada. Inicialmente foi testado um ensaio com um fio de pré-esforço liso, mas visto que

neste ensaio é importante a aderência entre o varão e o ligante, obteve-se maus resultados, daí optar-se por utilizar um varão indentado.

- O aço relativamente aos ensaios de pós-tensão, é um aço especial de alta resistência, que foi cedido pela empresa Trecem- Wire Products, S.A., empresa sediada em Aguada de Cima, no concelho de Águeda, a qual cedeu a quantidade necessária para ensaio de um aço com uma tensão de rotura da ordem dos 700MPa e um módulo de elasticidade de 206GPa.
- O aço relativamente aos ensaios de pré-tensão foi cedido pela empresa FAPRICELA,S.A., que facultou também o diagrama tensão-extensão do seu ensaio de tração, realizado no seu laboratório de controlo de qualidade e apresenta um módulo de elasticidade de cerca de 196GPa e uma tensão de rotura de 1864MPa. O diagrama apresenta-se na Figura3.3

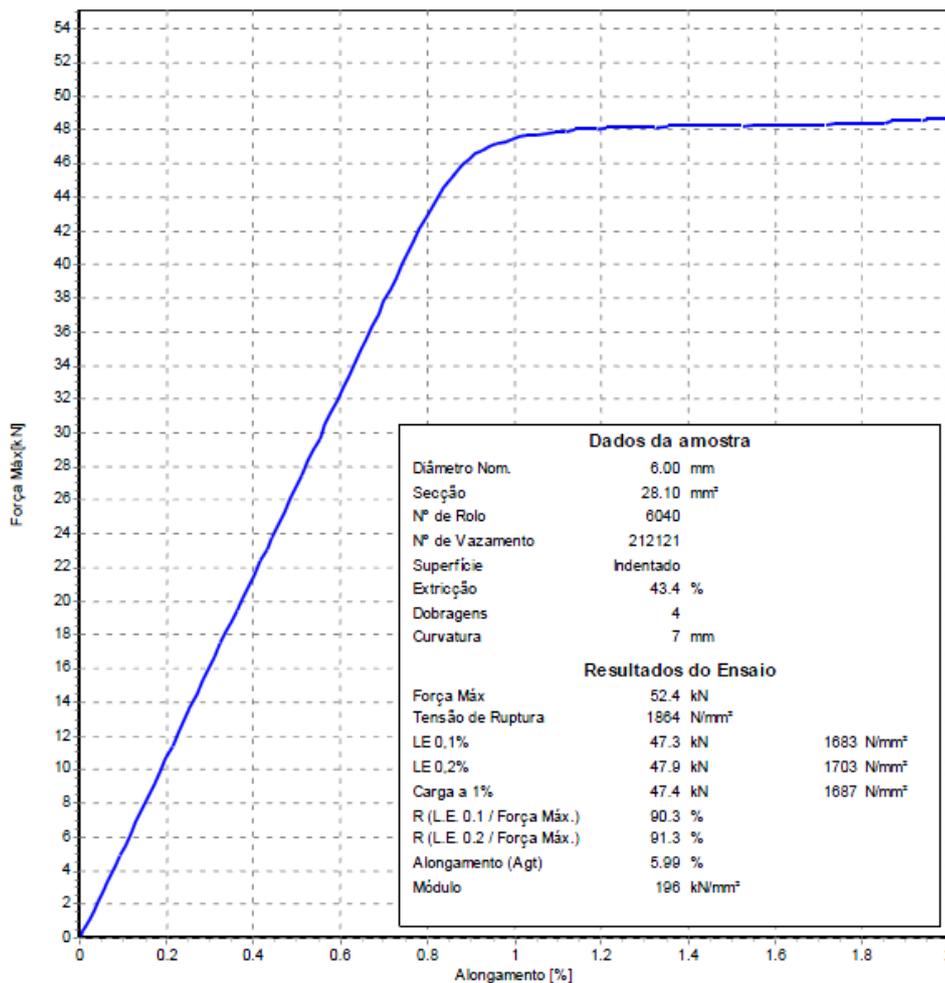


Figura 3.3- Resultados do ensaio de tração do aço

3.3 Ligantes

Neste estudo foram utilizados dois tipos de ligantes, que para se saber o seu modo de utilização consultou-se as fichas técnicas da SIKA.

- Icosit KC 220N: é um ligante da SIKA AG, com base em resinas de epóxi, fluido e de alta resistência, fornecido em dois componentes, de endurecimento a frio que pode ser usado no seu estado puro ou associado a cargas de quartzo. É recomendado para colagens e enchimentos sem retração. Tem como principais características a aderência total a betão, rebocos de cimento, pedras naturais ou artificiais, ferro, etc.. O tempo de cura é 18 horas. Tem boas propriedades físicas, mas no entanto a resistência ao corte não é referida na ficha técnica. Na Figura 3.4 é apresentada a imagem da cola.



Figura 3.4- Cola utilizada para a colagem das lamelas (Icosit KC220N)

A Icosit KC 220N foi utilizada na colagem de lamelas nos dois tipos de ensaios de pós-tensão.

- Sikadur 30 Normal: é uma argamassa tixotrópica, formada por duas componentes, baseada numa combinação de resinas epóxi. Não contem solventes. É utilizada para a colagem de elementos de reforço, especialmente em trabalhos de reforço estrutural. Como principais características, salienta-se uma elevada resistência à deformação sob carga permanente, muito boa aderência aos principais materiais utilizados na construção civil. Tem elevadas resistências mecânicas e é impermeável à água e ao vapor de água. A propriedade física da cola que pode interessar mais para este trabalho tem a ver com a sua resistência ao corte, visto que esta é essencial, no sistema baseado em colagem, para

a transmissão da força de pré-esforço do fio de aço para a madeira envolvente. No caso de colagem das duas tábuas para fecho de provete, foi igualmente usado este adesivo, mas apenas pela sua disponibilidade no local, bastando que tivesse sido utilizada numa simples cola de madeira. É de referir que a eficiência final da colagem depende do tempo de cura e da temperatura de cura. Na Figura 3.5 é apresentada a imagem da cola.



Figura 3.5-Cola utilizada para aderir o fio de aço pré-esforçado à madeira no ensaio de pré-tensão (Sikadur 30 Normal)

3.4 Porcas sextavadas e chapas metálicas

Para aplicação de pré-esforço, nos sistemas de ancoragem mecânica, utilizaram-se chapas de aço laminado corrente, com uma espessura de 10 mm e secção quadrada de 120mmx120mm, para evitar esmagamento dos topos de madeira e distribuir a carga uniformemente na secção desta. A amarração dos varões foi feita com porcas sextavadas de aço temperado, expressamente produzidas para o fim em vista, uma vez que as normalizadas não asseguravam a transferência das forças de ancoragem previstas. As porcas tinham comprimentos de 40 mm e 80mm, destinando-se as primeiras a serem colocadas nas extremidades dos provetes para garantir o estado de tensão, e num dos ensaios a servir como modo de transferência da força para o provete, daí terem um comprimento maior do que é normal e serem temperadas, para não correrem riscos de esmagamento. A porca de 80mm serve como emenda dos varões, para a produção em série dos provetes. Têm o dobro do comprimento das primeiras, para garantir a passagem da força do varão para a porca e desta para o segundo varão. Na Figura 3.6, pode-se visualizar os materiais aqui descritos.



Figura 3.6-Porcas sextavadas e chapa metálica, utilizadas no ensaio de pós-tensão

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TRABALHO EXPERIMENTAL

O pré-esforço é uma técnica de reforço de estruturas, que tem como vantagem melhorar o comportamento em serviço e a resistência das estruturas. Este trabalho consiste em mostrar dois modos distintos da sua aplicação a vigas de madeira, por pós-tensão e por pré-tensão.

Aplicação de pré-esforço por pós-tensão consiste:

- Na aplicação de tensão por meio de um cabo não aderente;
- A transferência de força é realizada nas extremidades, através de ancoragens.

A aplicação de pré-esforço por pré-tensão consiste:

- Na aplicação de tensão no aço antes da colocação da madeira e a sua posterior transferência para esta;
- A transferência de força é realizada por aderência neste caso recorrendo a colas estruturais.

Antes da realização dos ensaios, foi efetuado um estudo prévio, no qual é estudada a influência de alguns parâmetros, é feito o estudo de efeitos como o das perdas por recuperação elástica, de modo a que o ensaio seja realizado sem condicionantes que ponham em causa o seu funcionamento.

4.1 Propriedades e características dos provetes

Existem três tipos de provetes, com características muito semelhantes, diferindo apenas no seu comprimento, e no diâmetro do sulco. A justificação dos diferentes tipos de provetes tem a ver com o tipo de ensaio realizado, como mais adiante se compreenderá. Para melhor interpretação, a Figura 4.1, apresenta o esquema dos três provetes.

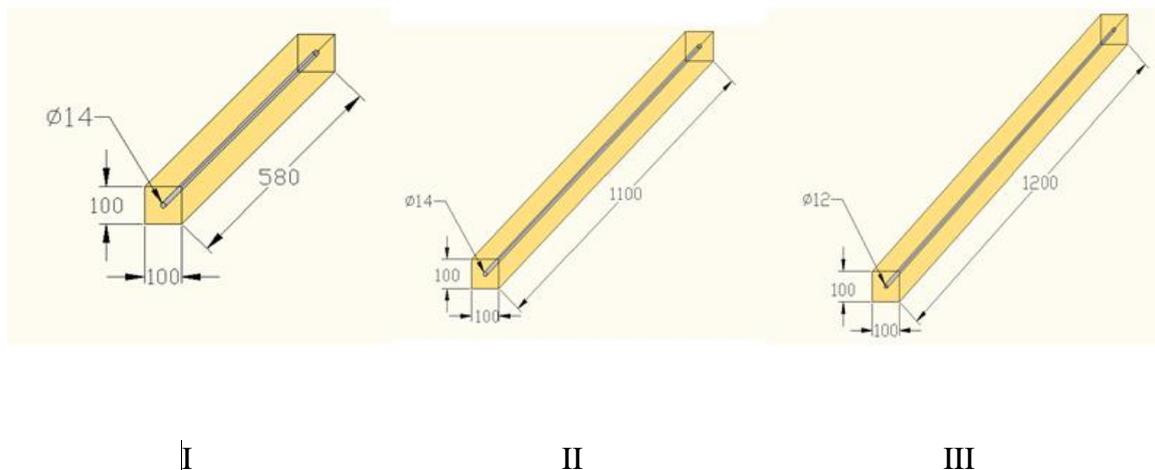


Figura 4.1-Tipos de Provetes

Cada provete é constituído por 2 lamelas, ambas com 50 mm de altura e 100mm de largura, originando provetes de secção quadrada de 100x100 mm². Em ambas as lamelas existe um sulco semicircular de modo que, quando unidas por colagem, a peça resultante fica com um furo circular longitudinal de 14mm de diâmetro, no caso dos provetes dos tipos I e II, e de 12mm no dos provetes do tipo III. Este furo tem como função acomodar o fio de pré-esforço, com ou sem colagem.

No Quadro 4.1, apresentam-se as dimensões relevantes para o estudo:

Quadro 4.1-Dimensões dos materiais

Tipo de provete	Secção			Aço			Ligante		
	bw (mm)	hw (mm)	Aw (mm ²)	φ (mm)	As (mm)	As reduzida (mm)	dint (mm)	dext (mm)	Pext (mm)
I	100	100	9846,1	12	113	86,59			
II									
III			9886,9	6	28,1		6	12	37,7

4.2 Método de aplicação de pré-esforço

Foram realizados três tipos de ensaios de pré-esforço, os dois primeiros apresentados de pós-tensão e por fim um de pré-tensão.

4.2.1 Aplicação de pré-esforço por aperto de porcas- Ensaio A:

Neste tipo de ensaio foi utilizado o provete do tipo I uma vez que, sendo a ancoragem feita por porcas apertadas nas extremidades, não era necessário garantir um comprimento de aderência para transferência de tensão do fio para o aço, pretendendo apenas verificar-se que se conseguia imprimir o aperto necessário à obtenção da tensão desejada, sem causar a rotura da rosca da porca ou do varão e sem uma torção excessiva deste, que causasse tensões espúrias que seriam responsáveis pela rotura prematura.

Apesar de se saber que a tensão de rotura do aço era na ordem dos 700MPa, não se sabia com exatidão. Por isso, com a finalidade de caracterizar o aço, realizou-se um ensaio de tração no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. O varão ensaiado tinha 40 cm de comprimento. O ensaio decorreu numa máquina universal de tração/compressão de 200kN, como se pode observar na Figura 4.2. A velocidade de aplicação de força de tração foi 0.05 mm/s.



Figura 4.2-Ensaio na máquina universal de tração/ compressão de 200kN

O ensaio deste varão permitiu concluir que a rotura se deu quando a tensão atingiu 734,2MPa, correspondente a uma força de 82,96kN, na parte de lisa, ou seja, na parte de secção reduzida a tensão é menor. Para isso foi feita uma relação que permitiu determinar qual seria a sua tensão de rotura de tração nessa mesma secção. Chega-se a esse valor da seguinte forma:

$$\text{Área do varão de } \phi 12 = 1,13 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área da secção reduzida para } \phi 10,5 = 0,8659 \text{ cm}^2$$

$$x = \frac{734,16 \cdot 0,8659}{1,13} = 563 \text{ MPa} \quad (1)$$

Para garantir segurança na execução do trabalho aplicou-se cerca de 80% da tensão de rotura na secção reduzida, 450MPa sendo este o valor também utilizado no estudo prévio realizado.

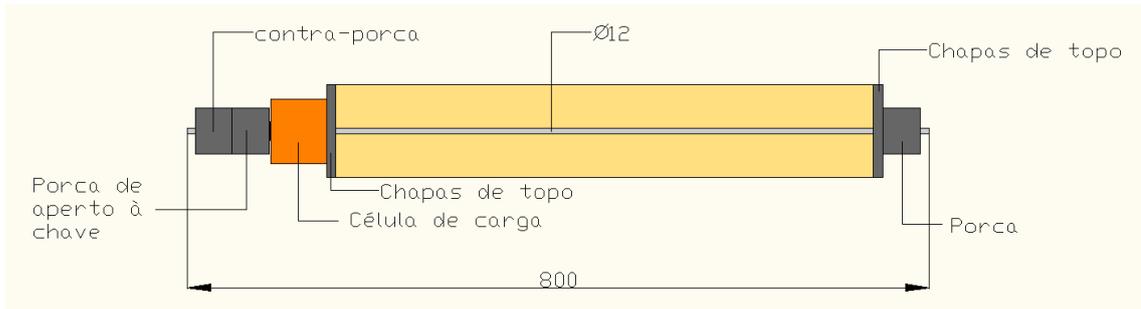


Figura 4.3-Esquema do ensaio A

A aplicação de pré-esforço realizou-se da seguinte forma:

1. O varão a pré-esforçar encontrava-se dentro do sulco dos provetes solto, mas ancorado com uma porca fixa numa extremidade;
2. O varão de pré-esforço foi tracionado pelo aperto de uma porca que se encontrava na extremidade oposta, originando uma determinada extensão inicial (ϵ_s^i) Este processo pode ser conduzido manualmente, havendo necessidade de uma contraporca para conseguir a aplicação do momento de aperto, o qual pode ser realizado com uma chave de porcas comum, desde que tenha um braço suficientemente longo. Para o controlo da força a aplicar foi colocada uma célula de 20 toneladas.

A vantagem deste método é a de que a compressão elástica da madeira acompanha o processo de aperto da porca não havendo, por conseguinte, necessidade de contabilizar como uma perda posterior ao termo do processo de aperto.

A desvantagem potencial é a do risco de esmagamento da rosca da porca ou do varão, devido ao elevado nível de tensão aplicada e ao atrito causado pelo processo de aperto. Com vista a minimizar este risco, foram produzidas porcas com comprimento de rosca superior ao das porcas normalizadas comuns, e posteriormente temperadas, por forma a endurecer o aço. Estes processos foram realizados na oficina do DEC. Foi ainda usada uma pasta lubrificante de carbono, utilizadas para fins similares pela indústria de pré-esforço.

4.2.2 Aplicação de pré-esforço por tração do fio de aço e sucessivamente aperto de porcas- Ensaio B:

Neste tipo de ensaio foram utilizados dois provetes do tipo II. Estes provetes eram mais longos do que os do caso anterior porque o método de aplicação de pré-esforço usado nesta variante é muito sensível a pequenas variações de extensão dos provetes, tanto mais difíceis de evitar quanto mais curtos forem estes.

O aço utilizado foi o mesmo que o do ensaio descrito anteriormente, logo optou-se por aplicar a mesma tensão de 450MPa.

Este ensaio, tem o mesmo princípio do ensaio anterior, apenas se pretendia demonstrar a possibilidade de produção em série deste elemento e a realização da ancoragem por aperto simples do varão pré-tracionado.

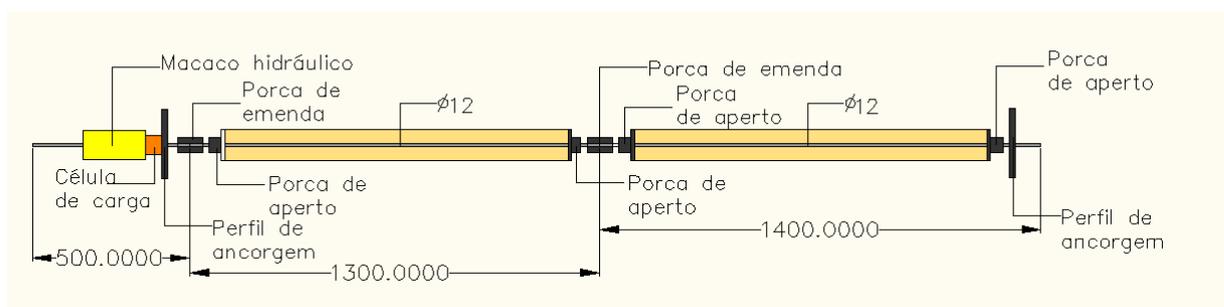


Figura 4.4-Esquema de ensaio B

A aplicação de pré-esforço é realizada da seguinte forma:

1. Os varões de pré-esforço encontravam-se dentro do sulco dos provetes soltos, mas ancorados nas extremidades;
2. Os varões foram tracionados pelo macaco hidráulico, originando uma extensão inicial, ϵ_s^i , este trabalhava em duas cantoneiras de aço que estavam fixas a uma viga metálica. Tanto as cantoneiras como a viga eram elementos de grande rigidez para garantir que não sofressem deformações. Para controlar a força aplicada foi colocada uma célula de carga de 20 toneladas;
3. Após o tensionamento dos varões, as porcas que se encontravam na extremidade foram apertadas manualmente, mantendo o estado de tensão que tinha sido aplicado. Os provetes encontravam-se ligados entre si por uma porca de emenda. Esta ligação pode ser observada na Figura 4.5.



Figura 4.5- Ligação entre os dois provetes

4. Por fim, após o aperto das porcas que se encontravam na extremidade desapertou-se a porca de emenda, passando assim os dois provetes a serem independentes um do outro, como se pode observar nas imagens da Figura 4.6.

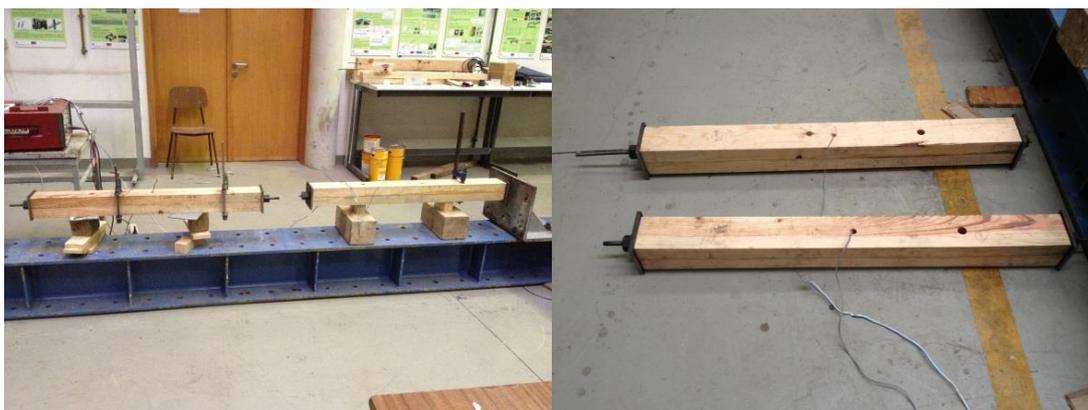


Figura 4.6 - Provetes independentes um do outro

Inicialmente era previsto fazer um ensaio semelhante a este, apenas com um provete. Em que a aplicação de pré-esforço seria realizada da seguinte forma:

1. O varão de pré-esforço encontrar-se-ia dentro do sulco do provete solto, mas ancorado nas extremidades;
2. O varão seria tracionado pelo macaco hidráulico até atingir a tensão desejada. Este trabalharia tal como no ensaio anterior em duas cantoneiras de aço fixas numa viga metálica. Para controlar a força aplicada pelo instrumento de tração seria utilizada uma célula de carga de 20 toneladas.

3. Tal como no ensaio em série, após o tensionamento do varão, as porcas das extremidades seriam apertadas manualmente, para manter o estado de tensão aplicado pelo macaco hidráulico. E este poderia ser retirado das cantoneiras para ser analisado.

A possibilidade de fazer um ensaio destes e obter bons resultados, seria maior com provetes de, dois ou três metros de comprimento, porque ao apertar as porcas, caso o provete seja muito pequeno, exerce-se força muito facilmente e o estado de tensão rapidamente se altera, podendo mesmo levar à rotura.

4.2.3 Aplicação de pré-esforço por tração do fio de aço e transferência de força pela aderência do ligante- Ensaio C:

Neste ensaio foi utilizado o provete tipo III. Este ensaio necessitou do provete mais comprido para garantir um comprimento de aderência para a transferência de tensão do fio de pré-esforço.

Pelo ensaio de tração do aço, realizado na empresa FAPRICELA, S.A., conclui-se que a força máxima é de 52,4kN, correspondendo a uma tenção de rotura de 1864MPa. Para garantir segurança na execução do trabalho aplicou-se uma força de aproximadamente 80% da força máxima, que corresponde a 42kN, sendo que este valor também foi utilizado no estudo prévio.

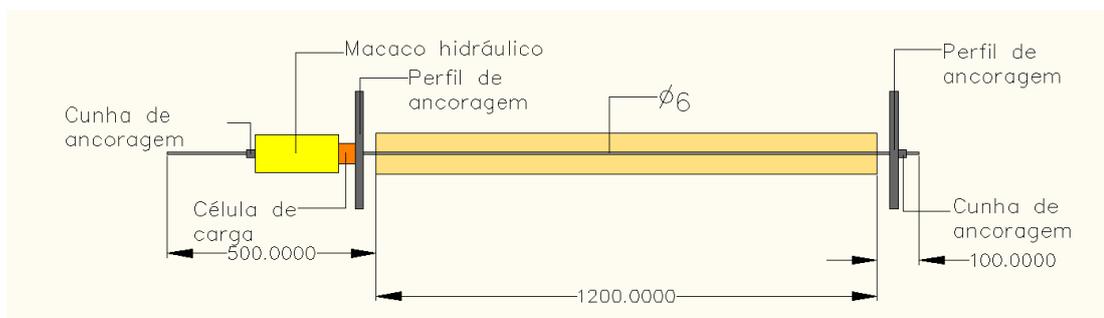


Figura 4.7-Esquema de ensaio C

A aplicação de pré-esforço é realizada da seguinte maneira:

1. Antes da realização do ensaio, limpou-se o fio de pré-esforço com acetona para eliminar possível gordura existente, para de seguida se colar o extensómetro. Na imagem da esquerda da Figura 4.8, pode distinguir-se a parte limpa da parte não limpa e na imagem da direita o extensómetro colado no varão.



Figura 4.8- Fio de pré-esforço

2. Tracionasse o fio de pré-esforço com o macaco hidráulico, originando uma determinada extensão inicial (ϵ_s^i), assim como no ensaio anterior, este trabalha em duas cantoneiras de aço fixas numa viga metálica. Para controlar a força aplicada utilizou-se uma célula de 5 toneladas
3. São colocadas e coladas as lamelas de madeira, mantendo o fio de aço tracionado. Em uma das lamelas foi feito um pequeno rasgo para passar o fio que faz a ligação do extensômetro ao Datalogger. Como já foi referido no Capítulo 3, o ligante utilizado foi Sikadur 30 Normal, sendo esta composta por 75% da componente A e 25% da componente B. A Figura 4.9, mostra a lamela com o ligante aplicado



Figura 4.9-Lamela de madeira com Sikadur 30N

4. Após a cura da cola, é libertado o fio de aço, induzindo deformações elásticas de compressão na madeira (ϵ_w) e conseqüentemente uma diminuição de extensão inicial no fio de aço (ϵ_s^f). O estado de tensão vai ser suportado pelo ligante.

A Figura 4.10 representa a secção transversal do provete do tipo III, onde pode ser observado que o varão está envolvido pelo ligante.

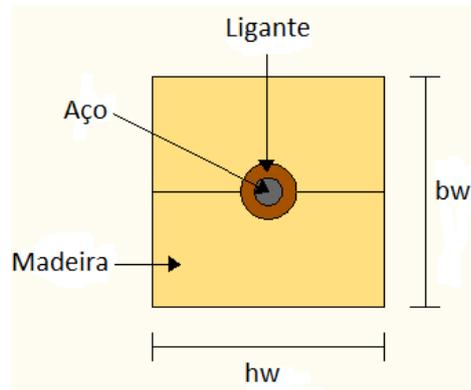


Figura 4.10-Secção transversal do provete

O ligante é rígido e, por isso, não existe escorregamento por distorção, o que fará diminuir o pré-esforço.

Após a explicação dos ensaios, pode-se então concluir o seguinte:

$$\epsilon_s^i = \epsilon_w + \epsilon_s^f \Leftrightarrow \frac{\sigma_s^i}{E_s} = \epsilon_w + \epsilon_s^f \quad (2)$$

Sendo:

ϵ_s^i : Extensão inicial do aço;

ϵ_w : Extensão da madeira;

ϵ_s^f : Extensão final do aço;

σ_s^i : Tensão inicial do aço;

E_s : Módulo de elasticidade do aço.

O sistema final terá que estar em equilíbrio, isto porque, a madeira terá que resistir à força de tração que é instalada no aço. Ou seja:

$$F_s^f = F_w \Leftrightarrow \epsilon_s^f * E_s * A_s = \epsilon_w * E_w * A_w \quad (3)$$

F_s^f : Força final instalada no aço;

F_w : Força instalada na madeira;

A_s : Área do aço;

A_w : Área da madeira;

E_w : Módulo de elasticidade da madeira.

4.3 Tensão de compressão na madeira

Como já foi referido a força aplicada será cerca de 80% da tensão máxima. No caso dos ensaios de pós-tensão, 450MPa, correspondendo na parte lisa a 51kN. No caso do ensaio de pré-tensão será aplicada uma tensão de 1495MPa, correspondendo a uma força de 42kN.

Através de um sistema de equações composto pelas expressões (2) e (3), onde as únicas incógnitas são ϵ_w e ϵ_s^f , obtém-se a expressão que dá o valor de ϵ_w .

$$\epsilon_w = \frac{\sigma_s^f * A_s}{E_s * A_s + E_w * A_w} \quad (4)$$

Através da lei de Hooke, calcula-se a tensão de compressão na madeira:

$$\sigma_w = \epsilon_w * E_w \quad (5)$$

No Quadro 4.2 apresentam-se os valores destas quantidades, para cada tipo de ensaio descrito anteriormente.

Quadro 4.2-Extensão e Tensão da Madeira

Ensaio	ϵ_w	$\epsilon_w\%$	σ_w (MPa)
A	0,00032	0,32	4,42
B			
C	0,00029	0,29	4,09

Segundo o EC5-1-1, ponto 6.1.4 (1) expressão 6.2, o valor da tensão de compressão a que a madeira está sujeita, tem que ser inferior ao valor da tensão de compressão resistente. O valor médio da tensão de compressão resistente, na direção paralela às fibras é de 32,9MPa, ou seja bastante superior aos valores das tensões de compressão na madeira, o que comprova a inexistência de plastificação das fibras de madeira, em todos os ensaios.

4.4 Encurvadura

O pré-esforço é um estado inerentemente estável, no que respeita a encurvadura, ou seja, o fio tenso no interior da peça impede que esta instabilize, pelo que não há necessidade da verificação da encurvadura.

4.5 Tensão tangencial ao corte

No Ensaio C, a força que se aplica ao varão de aço é transmitida ao ligante e deste à madeira. Segundo o EC5-1-1 ponto 6.1.7, para verificar a resistência ao corte, tem que ser verificada a seguinte condição:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (6)$$

Onde:

τ_d : tensão tangencial ao corte aplicada;

$f_{v,d}$: tensão de resistente tangencial ao corte

Esta verificação é feita devido à possibilidade de rotura coesiva na madeira, isto é, junto à interface colada, mas nas fibras de madeira.

4.5.1 Interface fio de aço/ligante

A tensão tangencial ao corte na interface fio de aço/ligante é dada pela seguinte expressão:

$$\tau_d = \frac{F_s^i}{A} \quad (7)$$

Onde:

τ_d : Tensão tangencial ao corte aplicada;

F_s^i : Força aplicada no aço;

A : Área de contacto para a transmissão da força, igual à superfície lateral de aço no comprimento de aderência admitido.

No betão armado o comprimento de amarração de 50 diâmetros é correntemente utilizado para amarração reta. Por isso, foi admitido também este valor para a madeira, uma vez que não há informação mais precisa a este respeito e se presume ser este valor superior ao efetivo.

Sendo assim o comprimento de transmissão da força para o fio de 6mm, toma o valor de:

$$:l_{trans.força} = 50 * 6 = 300 \text{ mm} \quad (8)$$

O perímetro correspondente ao fio de pré-esforço é:

$$p = 2 * \pi * r = 2 * \pi * 3 = 18,85 \text{ mm} \quad (9)$$

A área de contacto para a transmissão da força do fio de pré-esforço é igual a:

$$A = p * l_{trans.força} = 18,85 * 300 = 5654,9 \text{ mm}^2 \quad (10)$$

Sendo assim, pela expressão (7), chega-se ao valor da tensão tangencial ao corte na interface fio de aço/ligante da seguinte forma:

$$\tau_d = \frac{42 \cdot 10^3}{5654,9} = 7,43 \text{ MPa} \quad (11)$$

O ligante Sikadur 30 Normal, tem um valor entre 13-16 MPa de valor de resistência ao corte, isto porque foi optado como tempo de cura 3 dias e a uma temperatura ambiente de 15°C. Esta opção foi tomada, em conformidade com o disposto na ficha de produto da Sika, que relaciona o tempo de cura com a temperatura ambiente. Pode então ser concluído que verifica a condição apresentada pela expressão (6).

4.5.2 Interface ligante/madeira

O EC5 não cobre esta situação. No entanto, por falta de informação mais específica, admitiu-se que umas das possibilidades é a rotura por corte no interface ligante/madeira, com uma tensão igual à da resistência da madeira, isto considerando que a da resina é superior.

A tensão tangencial ao corte na interface ligante/madeira é dada pela seguinte expressão:

$$\tau_d = \frac{F_s^i}{A} \quad (12)$$

Onde:

τ : Tensão tangencial ao corte aplicada;

F_s^i : Força aplicada no aço;

A : Área de contacto para a transmissão da força, igual à superfície latera do furo praticado na madeira.

Como já foi referido, a força aplicada ao varão de aço é transmitida ao ligante, sendo que assim, passará do ligante para a madeira. Foi também admitido um comprimento de transmissão de força de 50 diâmetros da interface, sendo este obtido da seguinte forma:

$$l_{trans.força} = 50 \cdot 12 = 600 \text{ mm} \quad (13)$$

O perímetro corresponde a:

$$p = 2 * \pi * r = 2 * \pi * 6 = 37,7 \text{ mm} \quad (14)$$

A área de contacto para a transmissão da força é igual a:

$$A = p * l_{trans.força} = 37,7 * 600 = 22619,5 \text{ mm}^2 \quad (15)$$

Pela expressão (12), obtém-se o valor da tensão tangencial ao corte na interface ligante/madeira:

$$\tau_d = \frac{42*10^3}{22619,5} = 1,86 \text{ MPa} \quad (16)$$

O valor médio da resistência ao corte da madeira é de 4,53MPa, logo pela condição apresentada na expressão (6), existe segurança.

4.6 Dimensionamento das chapas de topo

Nos ensaios de pós-tensão (ensaio tipo A e B), a aplicação de forças de pré-esforço elevadas nas extremidades dos provetes origina concentração de tensões que poderão provocar o esmagamento da madeira. Assim, para prevenir esta situação colocaram-se chapas metálicas nas extremidades dos provetes. Serão apresentadas de seguida as verificações que foram efetuadas.

Verificação da resistência ao punçoamento segundo o EC3-1-8 Quadro 3.4:

$$\beta_{p,Rd} = \frac{0,6*\pi*d_m*t_p*f_u}{\gamma_{M2}} \quad (17)$$

Sendo:

$\beta_{p,Rd}$: Valor de cálculo de resistência ao punçoamento;

d_m : Menor diâmetro médio da porca em mm;

t_p : Espessura da chapa em mm;

f_u : Tensão última de rotura da chapa;

γ_{M2} : Coeficiente parcial de segurança que toma o valor de 1,25

Foram utilizadas porcas com diâmetro médio de 38 mm e chapas com uma tensão de cedência de 235MPa, o que corresponde a uma tensão última de 360MPa.

Na situação mais desfavorável, a espessura da chapa deverá ser suficiente para garantir:

$$\beta_{p,Rd} \geq P \quad (18)$$

Sendo que, P , é a força de pré-esforço aplicado no varão.

$$P = 50 \text{ kN} \leq \beta_{p,Rd} \Leftrightarrow t_p \geq 2,4 \text{ mm} \quad (19)$$

Tendo em conta que se utilizou um método de cálculo conservador, optou-se por utilizar chapas com 10 mm de espessura e uma secção de 120x120 mm².

Será também verificada a resistência da chapa à compressão, segundo o EC8-1-1 pelo ponto 6.2.4.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1 \quad (20)$$

A condição expressa que, o valor de cálculo de compressão, N_{Ed} , atuante na secção transversal, deve ser menor que o valor de cálculo do esforço normal resistente à compressão uniforme $N_{c,Rd}$.

Sendo que:

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{chapa} * f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{0,120 * 0,120 * 235 * 1000}{1} = 3384 \text{ kN} \quad (21)$$

A condição imposta pela expressão (20), toma o valor de 0,02, ou seja verifica com uma grande margem a resistência à compressão.

4.7 Aplicação do pré-esforço

As perdas associadas à aplicação de pré-esforço, agrupam-se em dois tipos: perdas instantâneas e perdas diferidas ao longo do tempo.

As perdas instantâneas ocorrem imediatamente após a aplicação de pré-esforço e podem ser:

- Perdas por atrito entre os materiais. São perdas que estão diretamente relacionadas com a aderência entre os materiais;
- Perdas devido à reentrada das cunhas de ancoragem;
- Perdas por deformação elástica. Estas perdas aplicam-se ao elemento de madeira;
- Escorregamento nos dispositivos de amarração-ancoragens.

As perdas diferidas ao longo do tempo ocorrem essencialmente devido a:

- Fluência da madeira;
- Retração da madeira;
- Relaxação do aço.

Neste trabalho apenas foram contabilizadas as perdas instantâneas, mais especificamente por deformação elástica.

4.7.1 Perdas por deformação elástica

Quando o fio de aço é libertado nos casos dos ensaios B e C, a madeira deforma-se, provocando uma diminuição da tensão no aço. No caso do ensaio A, como foi referido anteriormente, a compressão elástica da madeira acompanha o processo de aperto, não havendo, por conseguinte, necessidade de contabilizar perdas posteriores ao processo de aperto.

Através da expressão (4), foi calculado o valor da extensão na madeira e através da expressão (2) é possível calcular o valor da extensão final do aço.

$$\epsilon_s^f = \frac{\sigma_s^i}{E_s} - \epsilon_w \quad (22)$$

Pela lei de Hooke, calcula-se a tensão que corresponde à extensão final do aço, sendo que esta tensão vai corresponder a uma força final no aço, à qual a madeira terá que resistir.

$$\sigma_s^f = \epsilon_s^f * E_s \quad (23)$$

No Quadro 4.3 pode-se visualizar estes valores para cada tipo de ensaio.

Quadro 4.3-Esforços finais no aço

Ensaio	Tipo de provete	ϵ_s^f	ϵ_s^f (‰)	σ_s^f (Mpa)	F_s^f (kN)
B	II	0,00187	1,87‰	385,06	43,5
C	III	0,00733	7,33‰	1437,47	40,4

Por fim chega-se ao valor da percentagem das perdas por deformação elástica:

Quadro 4.4-Percentagem de perdas por deformação elástica de cada ensaio

Ensaio	% Perdas
B	14,5%
C	3,8%

Nos ensaio B, como se pode observar as perdas por deformação elástica são bastantes superiores, consequência do maior diâmetro e menor tensão de rotura do varão usado neste ensaio, se fossem iguais as perdas teriam valores muito próximos. Mas nestes tipos de ensaios é mais fácil recuperar as forças que são instantaneamente perdidas.

4.8 Alongamento do fio de aço e do provete de madeira

Os alongamentos esperados para os fios de aço e para o provete de madeira são traduzidos, respetivamente por:

$$\Delta l_s = \epsilon_s * L_s \quad (24)$$

$$\Delta l_w = \epsilon_w * L_w \quad (25)$$

No Quadro 4.5, apresenta-se o valor do alongamento calculado pelas expressões anteriores, para os diferentes tipos de ensaio.

Quadro 4.5-Alongamento do aço e da madeira

Ensaio	Δl_s (mm)		Δl_w (mm)
A	1,19		0,18
B	2,43	2,61	0,35
C	11,73		0,35

4.9 Ensaios experimentais

Este subcapítulo centra-se a descrição mais aprofundada dos processos realizados experimentalmente e os seus resultados. Vão ser aqui apresentados oito Provetes.

4.9.1 Provetes realizados segundo o ensaio A:

As lamelas dos provetes serão coladas com Icosit KC 220N, como já tinha sido referido no Capítulo 3, e só depois entrará o varão de aço pela perfuração. Para controlar o valor da tensão instalada no aço foi utilizado um extensómetro colocado a meio deste, como se pode observar na Figura 4.11 na imagem da esquerda.



Figura 4.11- Extensómetro instalado no fio de aço

Ligou-se o extensómetro a um aparelho de registo (Datalogger) que fornece a sua leitura. Como é possível observar na Figura 4.11, na imagem apresentada à direita, o provete tem duas aberturas circulares numa das faces, uma para a visualização do varão e outra para a saída do fio que liga o extensómetro ao Datalogger.

Na Figura 4.12, apresenta-se o esquema de ensaio utilizado.



Figura 4.12-Esquema de ensaio

Como já tinha sido explicado anteriormente, a força é aplicada pelo aperto da porca com a chave de fenda numa extremidade. Os provetes são apertados com grampos para evitar o seu movimento e torção durante o processo de aperto.

- Provede 1:

Este provede foi ensaiado, com o propósito de saber o seu modo de rotura e a força e tensão correspondente.

Pela Figura 4.13, observa-se que a rotura deu-se na parte de secção reduzida do varão e na extremidade onde estava a ser aplicada a força.



Figura 4.13-Rotura do varão

Apresentam-se de seguida duas Figuras (4.14 e 4.15), que nos mostram gráficos, com a relação entre a tensão e a extensão no aço, e a variação da tensão ao longo do tempo. Estes dados referem-se à secção reduzida, pois foi a zona crítica.

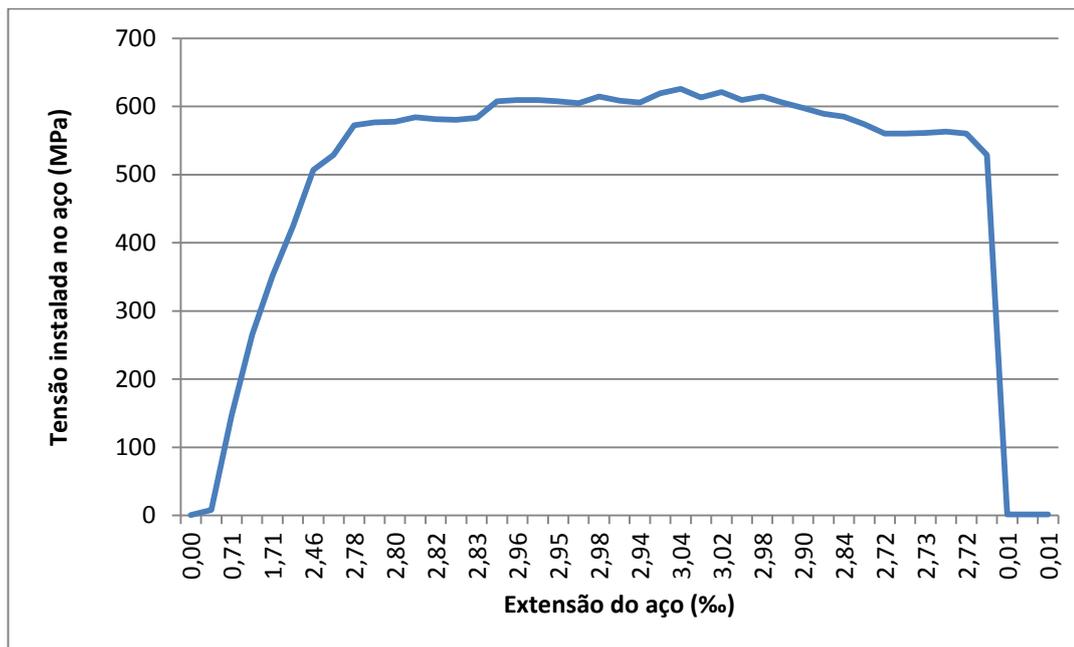


Figura 4.14-Relação entre a tensão e a extensão no aço na secção reduzida

Observando a Figura 4.14, verifica-se que a tensão máxima atingida foi 626MPa, correspondendo isto a uma extensão de 3,04%. A tensão de rotura é cerca de 529 MPa, correspondendo a uma extensão de 2,57%, sendo esta um pouco inferior ao valor da tensão máxima de tração que tinha sido determinada no ensaio do varão. Isto acontece devido à velocidade com que a força é aplicada, visto que neste ensaio foi aplicada manualmente, podendo então haver variações de velocidades que não existiam no ensaio do varão.

É importante referir que a tensão máxima no meio do varão, sítio onde se encontrava o extensómetro foi de 468MPa, o que corresponde a 53kN.

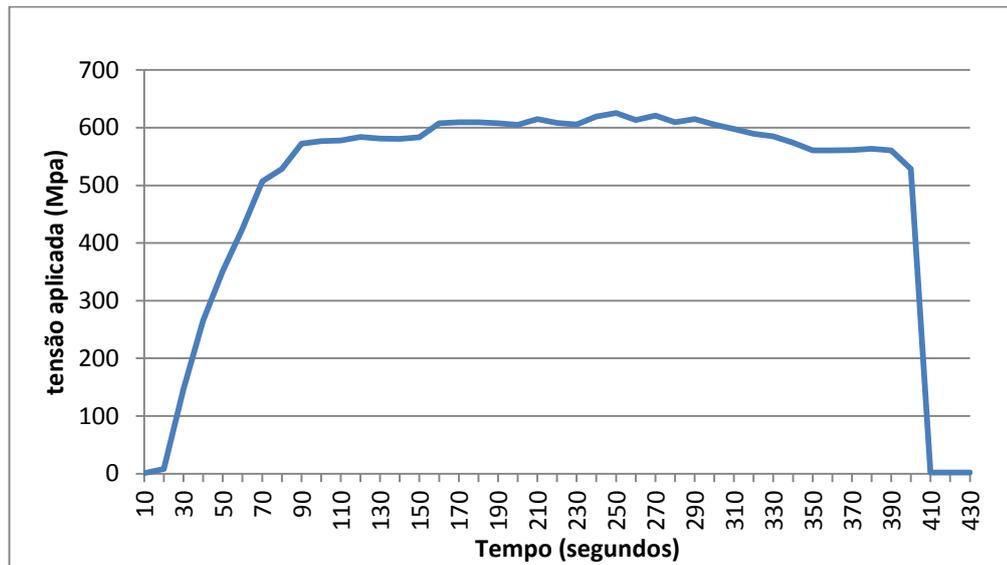


Figura 4.15-Variação da tensão instalada no aço ao longo do tempo

Pela Figura 4.15,conclui-se que atingiu a tensão máxima aos 250 segundos, ou seja cerca de 4 minutos. A partir de 70 segundos entrou no patamar plástico, com uma tensão de 507MPa e mais tarde ocorreu rotura aos 400 segundos (pouco mais de 6 minutos)..

- Provetes 2:

Este provete sujeitou-se ao mesmo esquema de ensaio do anterior, só que a carga aplicada foi cerca de 80% da força máxima do provete 1, ou seja, 42kN. Aplicou-se um pouco mais de força, 43,2kN o que correspondia a 499MPa na secção crítica. Na secção de varão liso corresponde a 381,95MPa.

As duas Figuras seguintes (4.16 e 4.17) apresentam gráficos com a relação entre a tensão e a força instaladas no aço, e a variação da tensão ao longo do tempo, na secção reduzida.

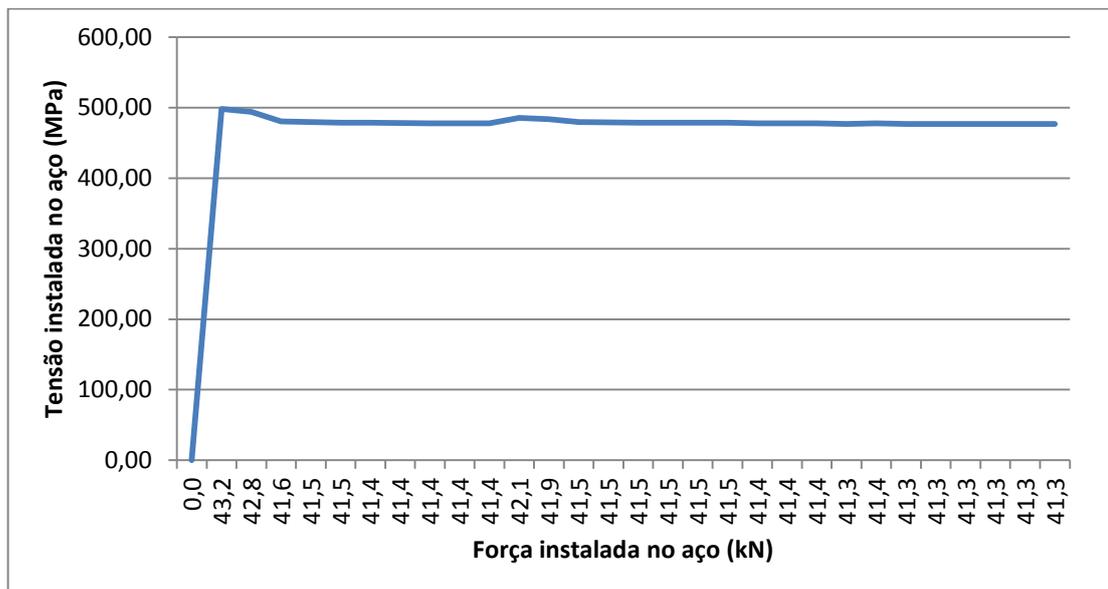


Figura 4.16- Relação entre a tensão e a força instaladas no aço

Pela observação da Figura 4.16 conclui-se que quando é atingida força de 43,2kN e a tensão correspondente de 498MPa, deixa de estar a ser exercida força no provete, existindo assim um decréscimo primeiros instantes estabilizando depois.

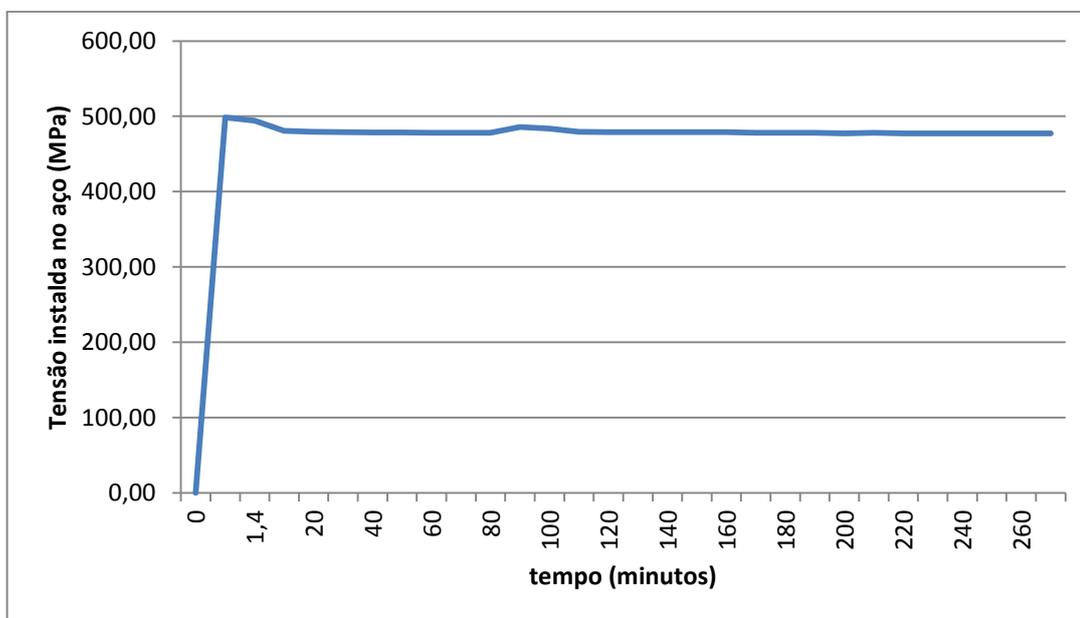


Figura 4.17-Variação da tensão instalada ao longo do tempo

Relativamente ao comportamento do provete ao longo do tempo, analisou-se a variação da tensão instalada no aço durante cerca de 4h30 e percebe-se pela análise do gráfico da Figura

4.17 que ao fim de aproximadamente 200 minutos (pouco mais de 3h), o provete praticamente estabilizou, retendo uma tensão de 477,2MPa, correspondendo a 41,3kN, ou seja, cerca de 95,7%% do pré-esforço inicial aplicado ao fio de aço. Os restantes 4.3% provavelmente deve-se a um ligeiro desaperto das porcas das extremidades.

Pela análise do gráfico da Figura 4.17, percebe-se também que a força de 43,2kN foi atingida após estar a ser exercida força durante cerca de 1 minuto.

4.9.2 Provete realizados segundo o ensaio B

Como já foi referido este ensaio tem o mesmo princípio do ensaio anterior, apenas se pretendia demonstrar a possibilidade da produção em serie de vários elementos. Por isso a produção dos provetes é feita da mesma maneira.

Na Figura 4.18 pode-se observar o esquema de ensaio

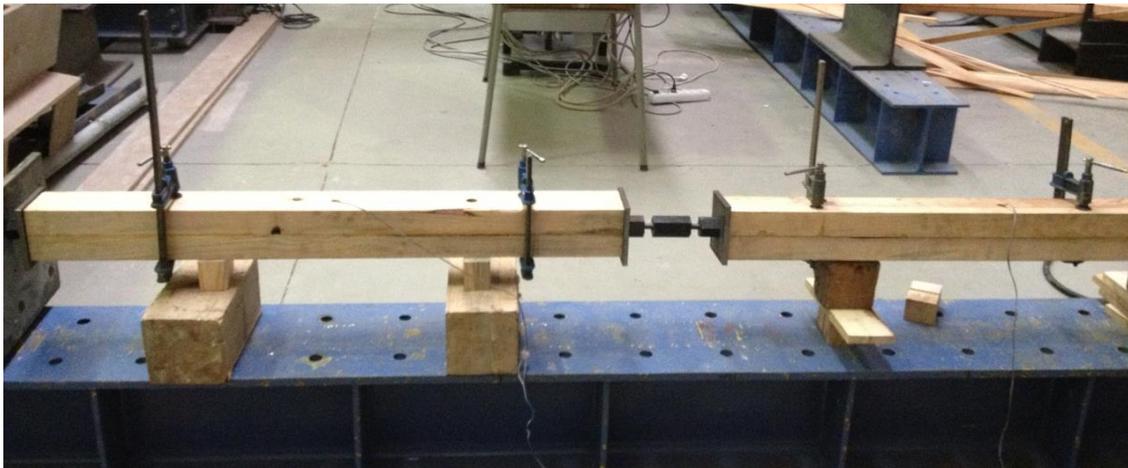


Figura 4.18- Esquema de ensaio

Optou-se por aplicar 43kN, um pouco mais do que foi aplicado no ensaio anterior, devido a perdas que possam existir pelo macaco hidráulico.

As Figuras 4.19 e 4.29 apresentam dois gráficos, referentes à variação da força após ter-se atingido os 43kN, até ao instante imediatamente antes da libertação do macaco hidráulico.

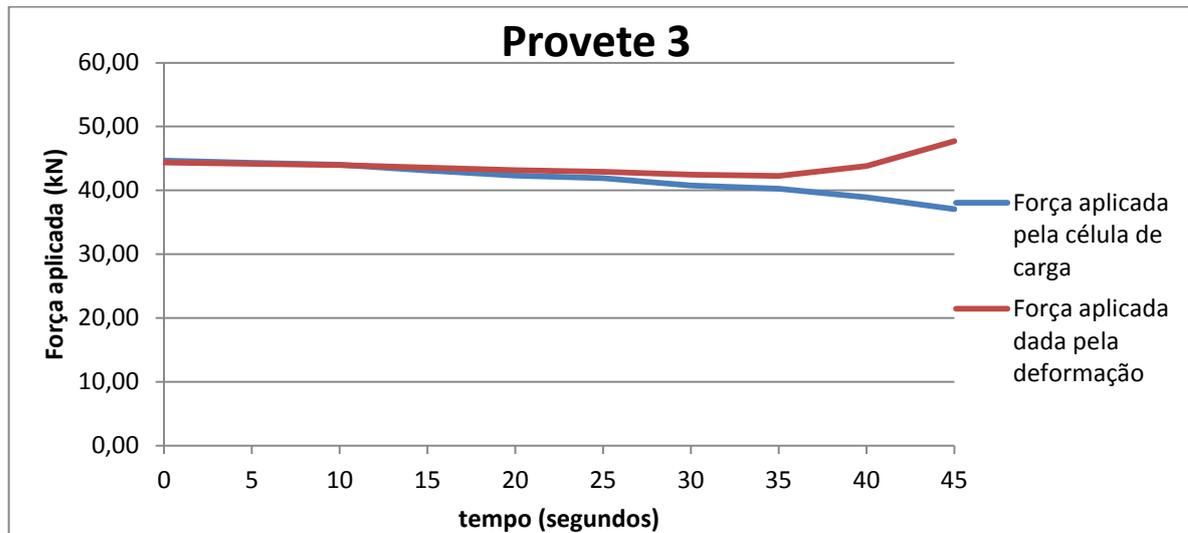


Figura 4.19-Variação da força antes da libertação do macaco hidráulico, referente ao provete 3

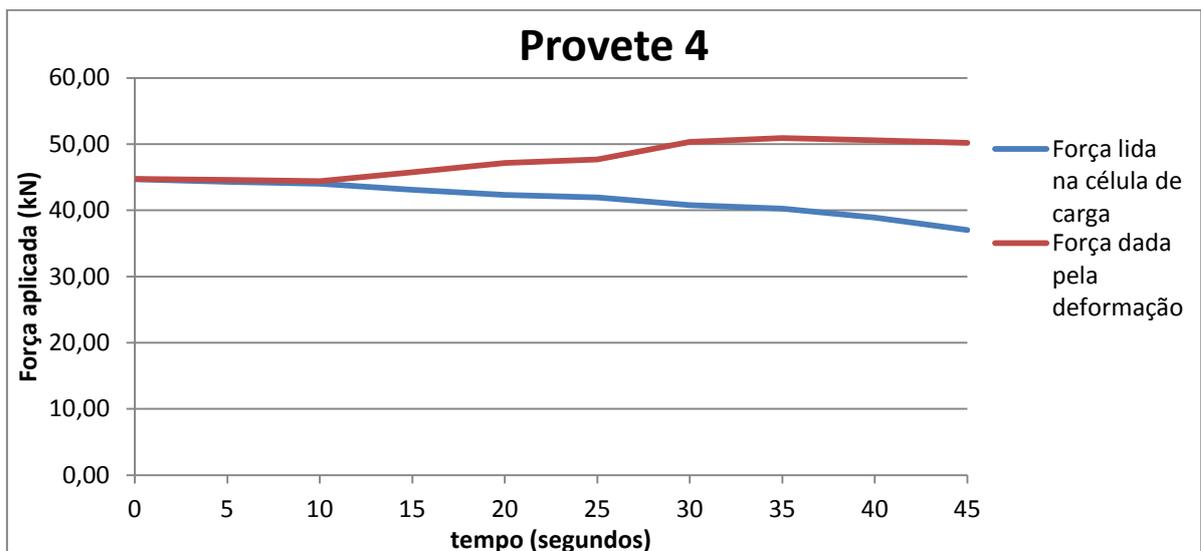


Figura 4.20-Variação da força antes da libertação do macaco hidráulico, referente ao provete 4

Como se pode observar pela análise dos gráficos apresentados nas duas Figuras, 4.19 e 4.20, após ter-se atingido cerca de 43kN nos primeiros instantes nos dois provetes, a força lida pela célula de carga coincide com a força dada pela deformação (lida pelo extensómetro que se encontra no meio de cada provete), mas no caso do provete 3 a partir de cerca dos 20 segundos e do provete 4 a partir de cerca dos 10 segundos, começou a haver uma diferença maior entre a leitura das duas forças, isto porque ao apertar as porcas nas extremidades de

cada provete, foi exercida força, e aumentou o valor da força dada pela deformação, sendo esta a força que está sendo aplicada no aço.

A força e a tensão que estavam a ser aplicadas antes da libertação do macaco eram:

$$\text{Provete 3: } F = 47,7 \text{ kN} ; \sigma = 422,4 \text{ MPa}$$

$$\text{Provete 4: } F = 50,2 \text{ kN} ; \sigma = 444,3 \text{ MPa}$$

É importante também referir a força e a tensão instalada antes da libertação do macaco, na secção reduzida, uma vez que esta é o local crítico.

$$\text{Provete 3: } F = 47,7 \text{ kN} ; \sigma = 550,8 \text{ MPa}$$

$$\text{Provete 4: } F = 50,2 \text{ kN} ; \sigma = 579,74 \text{ MPa}$$

Nas Figura 4.21, apresentam-se um gráfico que mostra a fase de libertação da força do macaco hidráulico para a madeira dos dois provetes, na parte da secção reduzida, à medida que é feita a transferência da força.

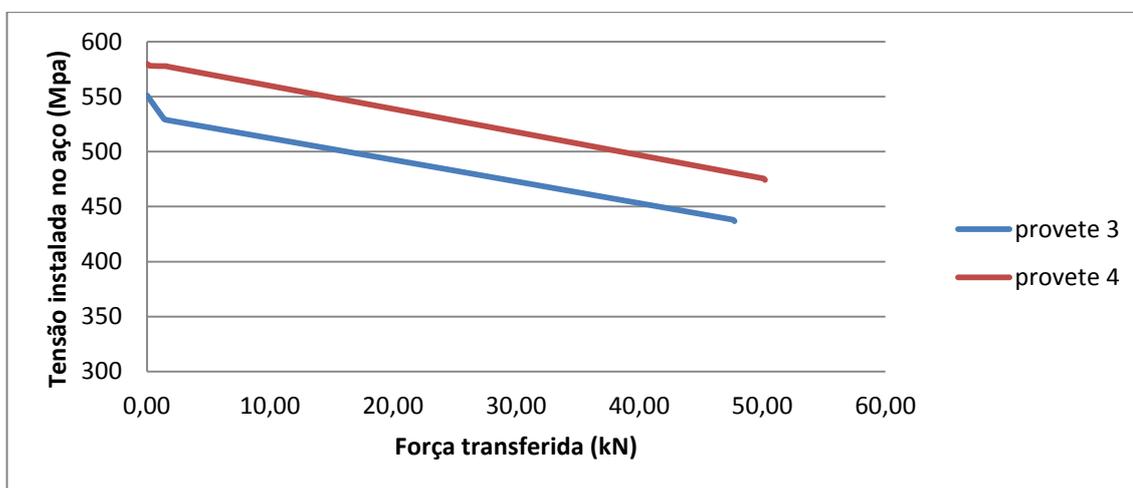


Figura 4.21-Fase de descarga da força nos dois provetes

Pela observação das duas séries do gráfico da Figura 4.21 conclui-se que estas têm um comportamento praticamente linear, significa isto que, a tensão instalada no aço decrece proporcionalmente à força transmitida pelo macaco hidráulico. No fim de descarregar as forças que estavam instaladas no aço, este fica com uma tensão instalada de 438MPa no

provete 3 e 472MPa no provete 4, o que significa uma perda de cerca de 20% e 19% respetivamente. Pelo estudo teórico, apresentado no subcapítulo 4.8.1, sabe-se que a deformação elástica da madeira neste tipo de provetes, representa uma perda de cerca de 14,5% da tensão inicial do aço. Isto significa que no caso do provete3 5,5% e 4,5% no provete4, foram as porcas colocadas nas extremidades de cada provete que perderam.

É importante aqui referir que entre a libertação do macaco hidráulico e o início da medição deste dados, houve um intervalo de tempo, de cerca de um minuto, onde foi libertada a ligação entre os dois provetes por desaperto da porca de emenda, tendo havido um manuseamento que pode ter causado ligeiras alterações no estado de tensão dos provetes.

$$\text{Provete 3: } F = 38,91 \text{ kN} ; \sigma = 449,4 \text{ MPa}$$

$$\text{Provete 4: } F = 40,55 \text{ kN} ; \sigma = 468,3 \text{ MPa}$$

- Provete 3

O gráfico das Figura 4.22 apresenta a variação da tensão ao longo do tempo, após a libertação do macaco.

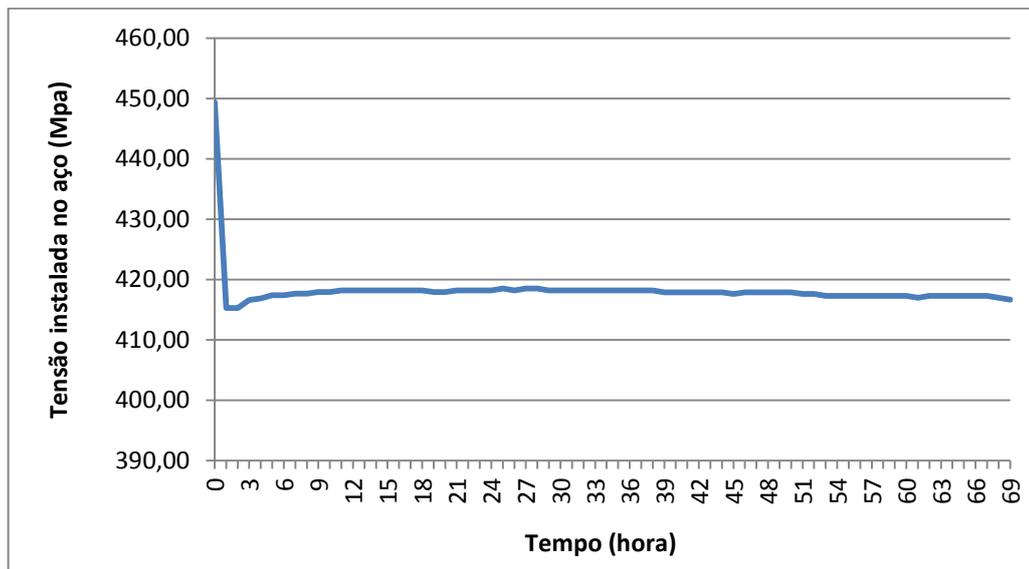


Figura 4.22-Variação da tensão instalada no aço ao longo do tempo

Relativamente ao comportamento do provete ao longo do tempo, pela análise do gráfico apresentado na Figura 4.22, percebe-se que ao fim de cerca 51 horas, começou a estabilizar,

retendo uma tensão de 417MPa que corresponde a uma força de 36,1kN, ou seja, cerca de 75,71% do pré-esforço que estava instalado inicialmente.

- Provete 4

Tal como no provete 3, a Figura 4.23, apresenta um gráfico com a variação da tensão ao longo do tempo, após a libertação do macaco.

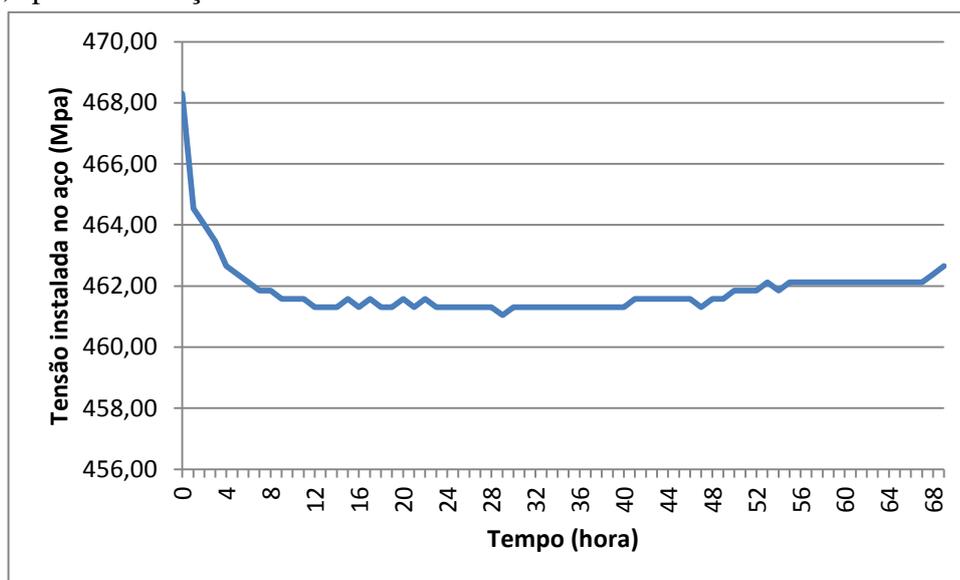


Figura 4.23-Variação da tensão instalada ao longo do tempo

Relativamente ao comportamento do provete ao longo do tempo, pela análise do gráfico apresentado na Figura 4.23, percebe-se que ao fim de cerca 59 horas, começou a estabilizar, retendo uma tensão de 462MPa que corresponde a uma força de 40kN, ou seja, cerca de 80,8% do pré-esforço que estava instalado inicialmente

- Comparação dos resultados do Provete 3 e Provete 4:

Como já se referiu, inicialmente quando foi feita a conceção deste ensaio o objetivo, seria testar a aplicação de pré-esforço em vários provetes em série, tentando que estes tivessem um comportamentos semelhante entre eles, ou seja a força instalada no aço fosse a mesma e a percentagem de perdas seria praticamente a mesma, mas tal não aconteceu. Isto porque apesar de a força aplicada pelo macaco hidráulico ser a mesma, quando foi feito a aperto das porcas que se encontravam na extremidade, houve um aumento da força e da tensão instalada no aço. Como já foi referido, esse aumento não foi o mesmo nos dois provetes. No provete3 houve um aumento de 7% e no provete4 um aumento de 11%, a partir desse instante, no decorrer do ensaio a força instalada no aço seria sempre superior no provete 4.

4.9.3 Provetes realizados segundo o ensaio C

Um trabalho semelhante a este foi realizado pelo aluno Cedrico Moderno, do Departamento de engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Tem-se como objetivo, comprovar os resultados obtidos e fazer uma comparação de resultados.

O ensaio realizado nestes provetes consiste, na aplicação do pré-esforço no aço utilizando um macaco hidráulico.

Na Figura 4.24 pode ser visualizado o esquema do ensaio.

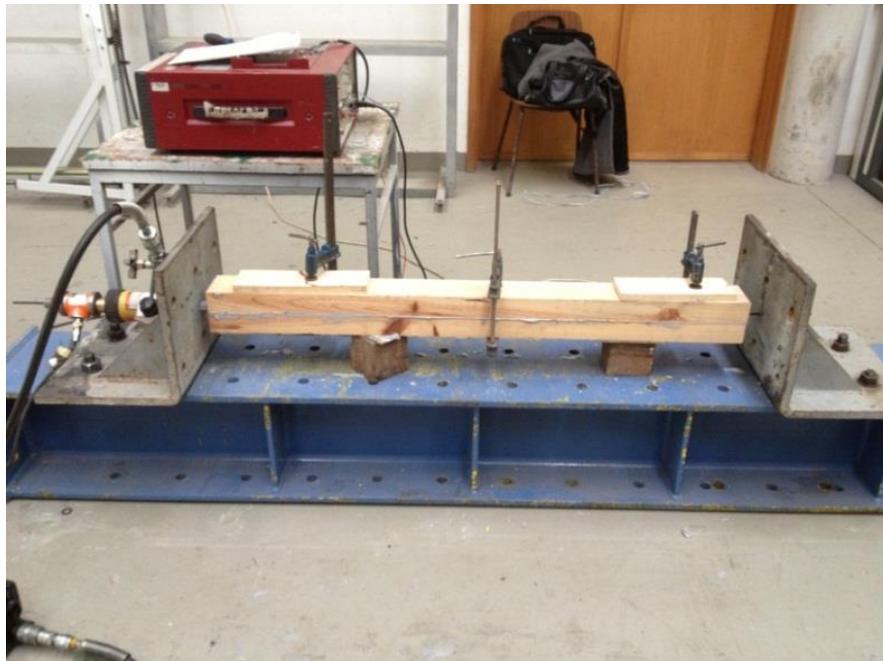


Figura 4.24- Esquema final do ensaio

Passado o tempo de cura da cola, irá se prosseguir à descarga do macaco hidráulico, onde este transfere a tensão para a madeira. O provete continua ligado ao Datalogger para continuar à análise do comportamento ao longo do tempo, onde irá ser avaliado a percentagem de perdas de tensão aplicada no aço, ao longo de um dado período de tempo.

- Provete 5

A força aplicada ao provete foi 40,5kN, o que corresponde a 1440,4MPa (um pouco inferior aos 42kN).

Durante os três dias de cura existiu uma perda de força do macaco hidráulico, sendo assim a força que estava instalada no aço era de 37,12kN, correspondendo a uma tensão de 1321,02MPa.

No gráfico da Figura 4.25, será apresentada a fase de libertação da força aplicada pelo macaco hidráulico para o provete, mostrando a perda de tensão no aço por encurtamento elástico, à medida que é feita a transferência da força.

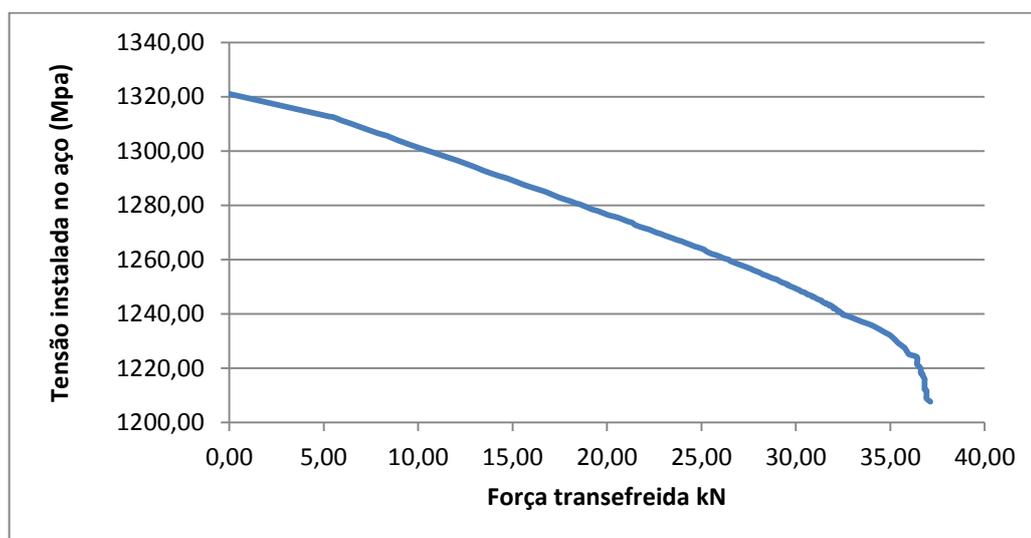


Figura 4.25- Fase de descarga da força

Pela observação do gráfico da Figura 4.25, conclui-se que o gráfico tem um comportamento muito próximo do linear, significando com isto que a tensão instalada no aço decresce proporcionalmente com a força transmitida pelo macaco hidráulico, tal como era esperado

No fim de descarregar a força, ficou instalada uma força de 33,9kN correspondendo a uma tensão de 1206,71MPa, significa que perdeu cerca de 8,65% da tensão instalada. Considerando que é nesta fase que se deu a totalidade da deformação elástica da madeira, pelo estudo apresentado no subcapítulo 4.7.1, sabe-se que a deformação elástica da madeira apresenta uma perda de 3,8% da tensão inicial do aço, significa então que a cola perdeu cerca de 4,85%.

A Figura 4.26, representa um gráfico com a variação da tensão ao longo do tempo, após a libertação do macaco hidráulico.

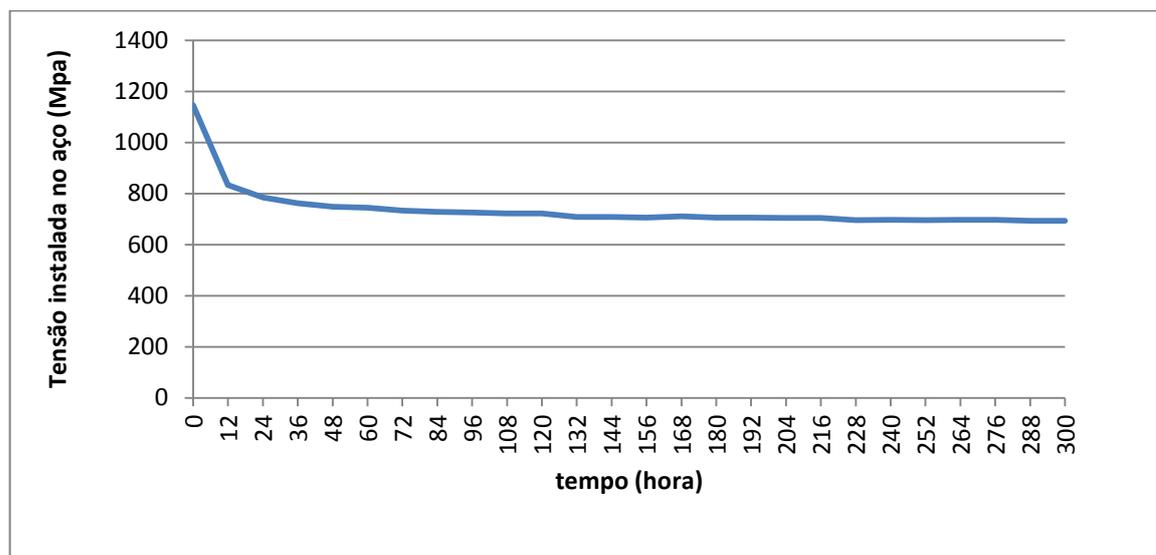


Figura 4.26-Variação da tensão ao longo do tempo

Pela observação do gráfico da Figura 4.26, o estado tensão estabilizou aos 693MPa, o que corresponde a uma força de 19,5kN, ou seja manteve cerca de 52% da força de pré-esforço instalado antes da libertação do macaco hidráulico

Relativamente ao estado de tensão ao longo do tempo, o provete começou a estabilizar ao fim de 252 horas.

Como pode ser concluído, os resultados não são os mais esperados, devido ao facto de haver uma grande perda de tensão.

- Provete 6:

Devido aos maus resultados obtidos pelo provete 5, existiu uma diferença entre o provete 5 e o provete 6 na preparação do ensaio. O primeiro realizou-se à temperatura ambiente, pelo que devia ser cerca de 12°C no máximo, mas no provete 6, para melhorar o seu desempenho, houve um aquecimento do material a usar (Ligante e as duas lamelas de madeira). Foi colocado num forno a 35°C, durante um determinado período de tempo e durante o tempo de cura também foi colocado um aquecedor perto do ensaio para manter a temperatura ambiente mais alta.

A força aplicada foi 42,1kN, correspondendo a uma tensão de 1482,8MPa.

Após os três dias de cura, quando foi libertada a força do macaco hidráulico, a força que estava instalada no aço era de 41,2, correspondendo a uma tensão se 1465,2MPa.

No gráfico da Figura 4.27, será apresentada a fase de libertação da força aplicada pelo macaco hidráulico para o provete, mostrando a perda de tensão no aço por encurtamento elástico, à medida que é feita a transferência da força.

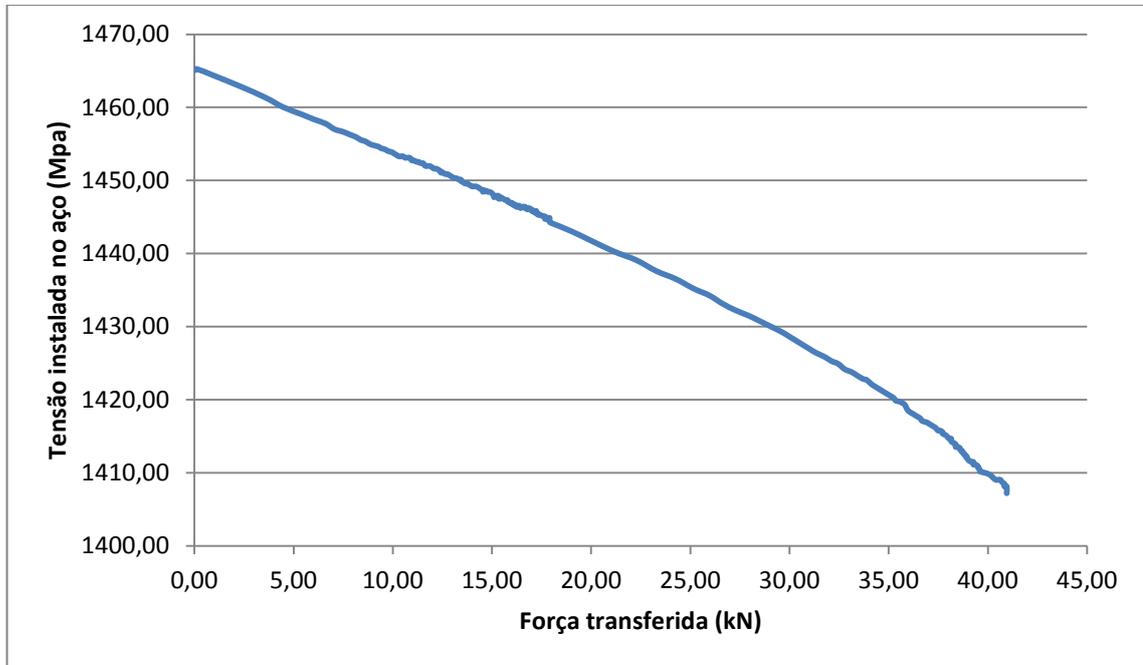


Figura 4.27-Fase de descarga da força

Observando o gráfico da Figura 4.27, conclui-se que tal como no provete 5, o gráfico tem um comportamento praticamente linear, significando que a tensão instalada no gráfico decresce proporcionalmente com a força transmitida pelo macaco hidráulico.

Após descarregar a força de 41,2kN que se encontrava instalada no aço, correspondendo esta a uma tensão de 1465,3MPa, ficou instalada uma força de 39,5kN, correspondendo a 1407,2MPa. Significa que perdeu 3,96% da tensão instalada. Tal como no provete 5, é considerado que é nesta fase que se deu a totalidade da deformação elástica da madeira. Pelo estudo apresentado no subcapítulo 4.7.1, sabe-se que a deformação elástica da madeira apresenta uma perda de 3,8% da tensão inicial do aço, significa isto que a cola perdeu cerca de 0,16%. Este ensaio tem uma melhoria bastante significativa, isto deve-se ao pré-aquecimento dos materiais aproximadamente a 35°C.

O gráfico da Figura 4.28 apresenta a variação da tensão ao longo do tempo, após a libertação do macaco hidráulico.

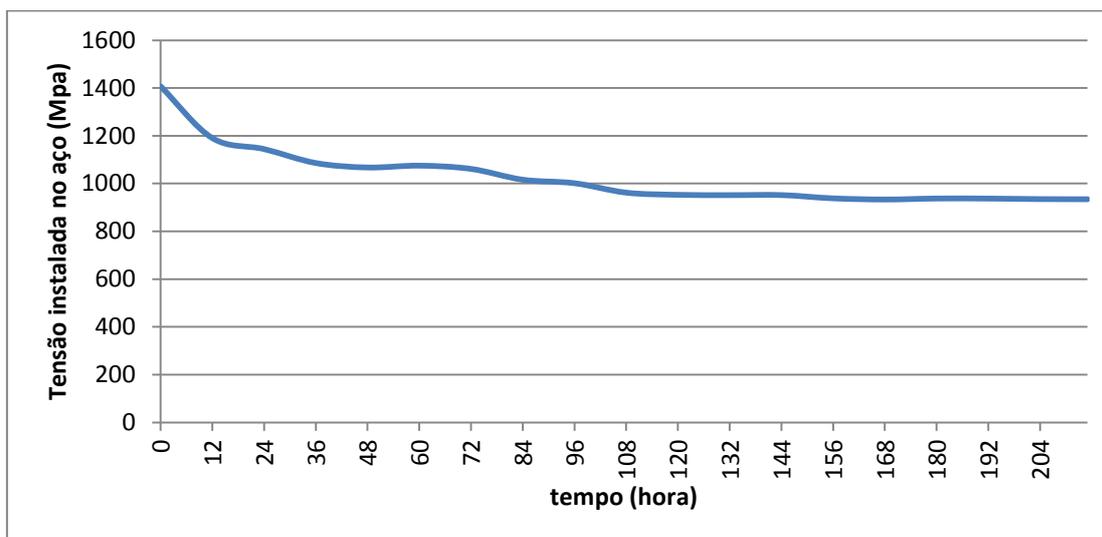


Figura 4.28-Variação da tensão ao longo do tempo

Pela observação do gráfico da Figura 4.28, o estado de tensão estabilizou aos 934,4MPa, correspondendo a uma força de 26,3kN, ou seja, perdeu cerca de 36% da força de pré-esforço que estava aplicada antes da libertação do macaco hidráulico.

Relativamente ao estado de tensão ao longo do tempo, este provete esteve menos tempo que o outro provete anterior a ensaiar, visto que também começou a estabilizar ao fim de 156 horas.

Foram realizados dois provetes, que serão apresentados de seguida com o mesmo esquema do anterior, cujo objetivo era perceber qual o comprimento de transmissão da força para o provete durante a fase de descarga. Foi monitorizado um fio de aço com 5 extensómetros, espaçados entre si 8 cm.

- Proвете 7

Pode-se observar na Figura 4.29 os extensómetros colocados no fio de aço antes e depois da cola aplicada. (Ext1-L=8cm, Ext2-L=16cm, Ext.3-L=24cm, Ext.4-L=32cm, Ext.5-L=40cm).



Figura 4.29- Extensômetros no fio de aço

Na Figura 4.30 pode-se visualizar os fios dos extensômetros, já com as duas lamelas de madeira coladas.



Figura 4.30- Passagem dos fios do extensômetro

A força inicialmente aplicada pelo macaco hidráulico foi de 42,43kN, correspondendo a uma tensão de 1513,6MPa, mas devido a uma ligeira perda de tensão durante os três dias de cura, a tensão que passou a estar instalada é 1423MPa que corresponde a uma força de 39,984kN.

Na Figura 4.31, é apresentado um gráfico com os resultados da fase em que se liberta a força.

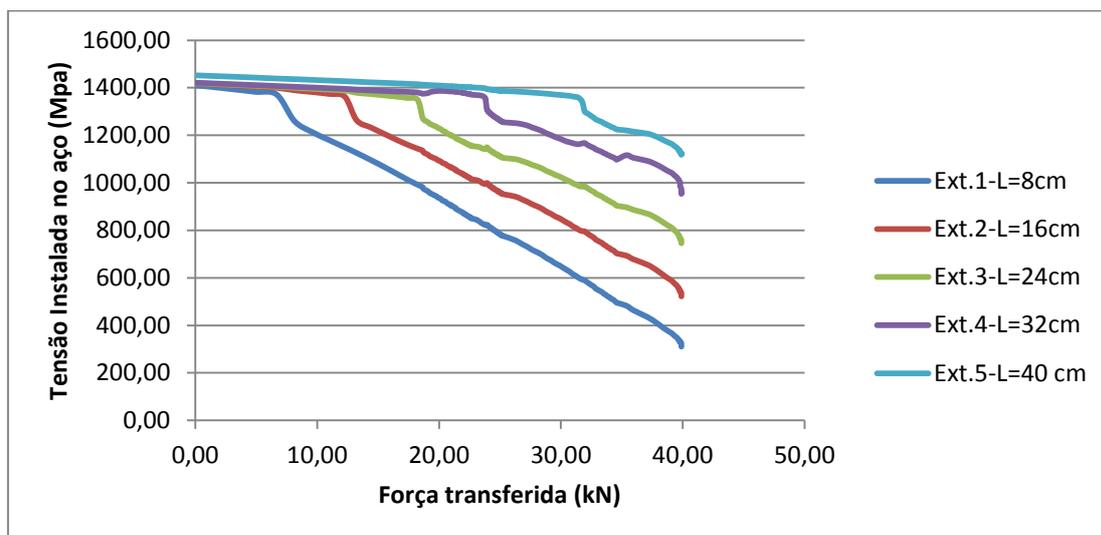


Figura 4.31-Resultado do ensaio

- L=8cm: $\sigma=310,8\text{MPa}$ (22,05% da Tensão aplicada)
- L=16cm: $\sigma=522,01\text{MPa}$ (37,03% da tensão aplicada)
- L=24cm: $\sigma=745,54\text{MPa}$ (52,89% da tensão aplicada)
- L=32cm: $\sigma=953,48\text{MPa}$ (67,64% da tensão aplicada)
- L=40cm: $\sigma=1119,85\text{MPa}$ (79,44 % da tensão aplicada)

Pela observação do gráfico da Figura 4.31 e dos valores apresentados, conclui-se que o comprimento no qual se dá a transferência de força será um valor superior aos 40cm. No entanto é de realçar que os valores estão condicionados devido à aplicação dos extensômetros, significa com isto que existe uma diminuição da área disponível para a transferência da força. Considerando que cada extensómetro esta a ocupar 1,5cm de comprimento, essa diminuição é de cerca de 19%.

Contabilizando a área condicionada, supondo que a transmissão da força é proporcional à área, os valores obtidos irão corresponder a cerca de 81% dos valores reais, ou seja, a tensão que estaria instalada no aço aos 40 cm seria 1390,201MPa, isto é 97,7% da força já tinha sido transferida, sendo assim, o comprimento previsível para a transferência d força será 41cm (68 vezes o diâmetro).

Na Figura 4.32, apresenta a variação da tensão ao longo do tempo. Será apenas apresentado aqui os valores referentes ao extensómetro que se encontrava na posição de 40 cm. No anexo A, encontra-se a Figura A, referente a mais um ponto do provete, onde se pode comprovar a variação da tensão ao longo do tempo é muito semelhante à apresentada a seguir.

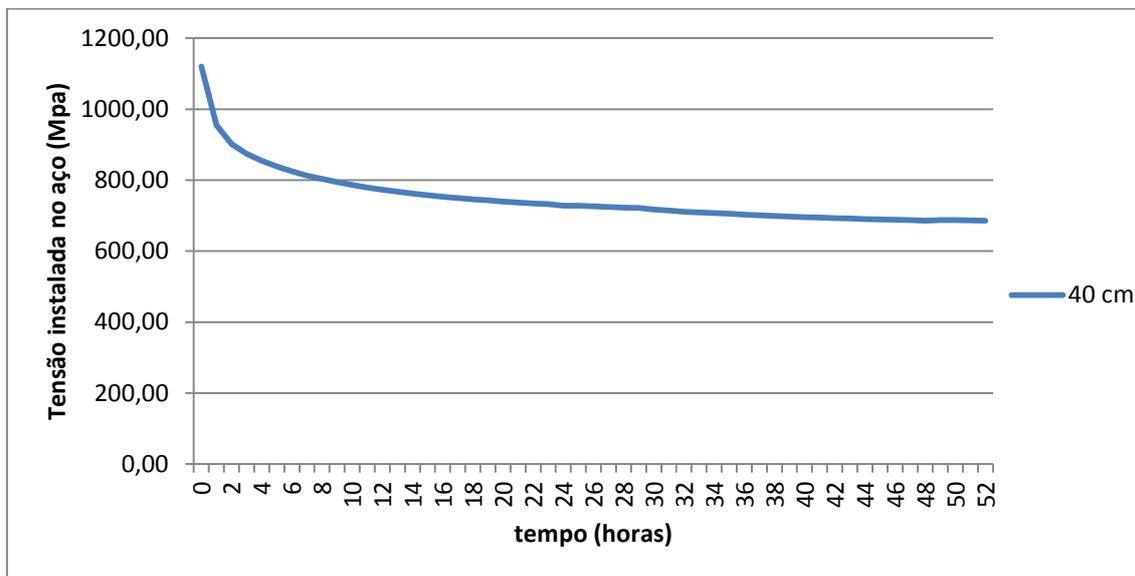


Figura 4.32- Variação da tensão ao longo do tempo

Pela observação do gráfico da Figura 4.32, conclui-se que a tensão estabilizou com cerca de 686MPa, correspondendo a 19,3kN. Retendo assim cerca de 47% do pré-esforço instalado naquele ponto antes da libertação do macaco.

Em relação à variação da tensão ao longo do tempo, observando o gráfico da Figura anterior conclui-se que a tensão começou a estabilizar cerca de 45 horas após estar a ensaiar.

- Provetes 8

Este ensaio vai diferir do anterior na disposição dos extensómetros, mas tem na mesma como objetivo saber qual o comprimento da transmissão da força, o primeiro extensómetro encontra-se a 24cm da extremidade do provete e o último a 56cm. Para melhor interpretação pode-se visualizar a Figura 4.33.



Figura 4.33-Extensômetros no fio de aço

Neste ensaio optou-se por a aplicação de uma força menor, 30kN, mas tendo em conta as perdas que existem durante a cura, foi aplicada cerca de 31,95kN, correspondendo a 1136,9MPa.

Após os três dias de cura, quando foi libertada a força do macaco hidráulico, a força que estava instalada no aço era de 31,36kN, correspondendo a uma tensão se 1116MPa, como se pode reparar quase não existiram perdas.

Na Figura 4.34, é apresentado um gráfico com os resultados da fase em que se liberta o macaco hidráulico.

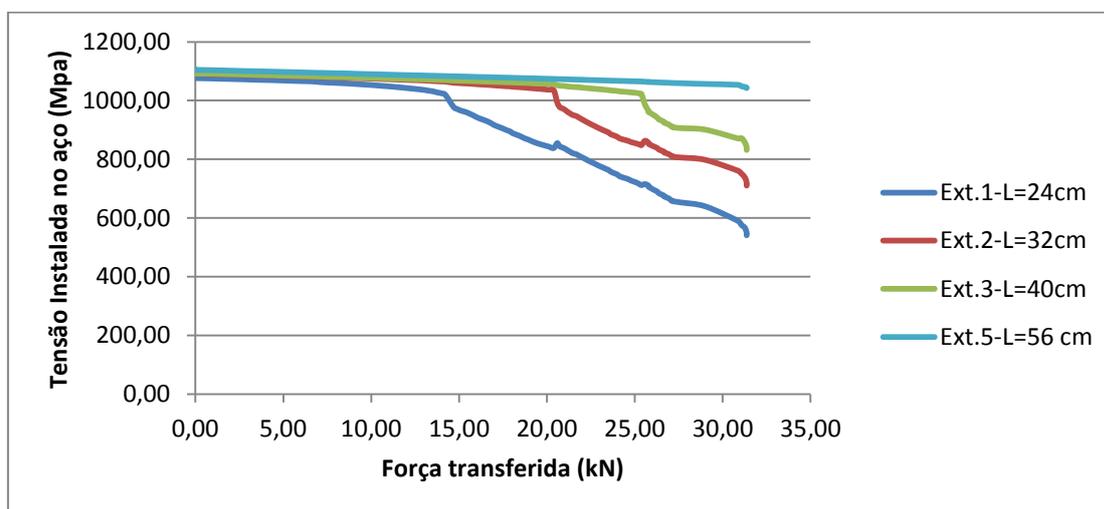


Figura 4.34-Resultados do ensaio

Como se pode observar na Figura 4.34, não está representada a série no gráfico referente ao extensómetro colocado a 48cm, devido a uma falha no extensómetro, que não conseguiu registar valores, sendo assim, não estarão aqui representados os seus resultados.

- L=24cm: $\sigma=540,96\text{MPa}$ (48,47% da tensão aplicada)
- L=32cm: $\sigma=710,32\text{MPa}$ (63,64% da tensão aplicada)
- L=40cm: $\sigma=831,59\text{MPa}$ (74,51% da tensão aplicada)
- L=56cm: $\sigma=1042,52\text{MPa}$ (93,41% da tensão aplicada)

Pela observação do gráfico da Figura 4.34 e dos valores apresentados, conclui-se que o comprimento no qual se dá a transferência de força será um valor muito próximo dos 56cm. No entanto é de realçar que os valores estão condicionados devido à aplicação dos extensómetros, significando com isto que existe uma diminuição da área disponível para a transferência da força, considerando que cada extensómetro esta a ocupar 1,5cm de comprimento, essa diminuição é de cerca de 14%.

Contabilizando a área condicionada, supondo que a transmissão da força é proporcional à área, os valores obtidos irão corresponder a cerca de 86% dos valores reais, ou seja, a tensão que estaria instalada no aço aos 56 cm seria já o valor da tensão aplicada. Aos 40 cm a tensão que estava instalada era 987,83MPa, o que corresponde a 88% da força aplicada, portanto o comprimento de transmissão da força dá-se aos 45 cm (75 diâmetros)

Tal como no ensaio anterior, em relação ao comportamento ao longo do tempo, apresenta-se de seguida, a Figura 4.35. Serão apenas apresentados aqui os valores referentes ao extensómetro que se encontrava na posição de 56 cm, sendo que neste caso aos 56 cm, a força já tinha sido transferida totalmente. No anexo B, na Figura B, encontra-se um gráfico referente a mais um ponto do provete, onde se pode comprovar que a variação da tensão ao longo do tempo é muito semelhante à apresentada a seguir.

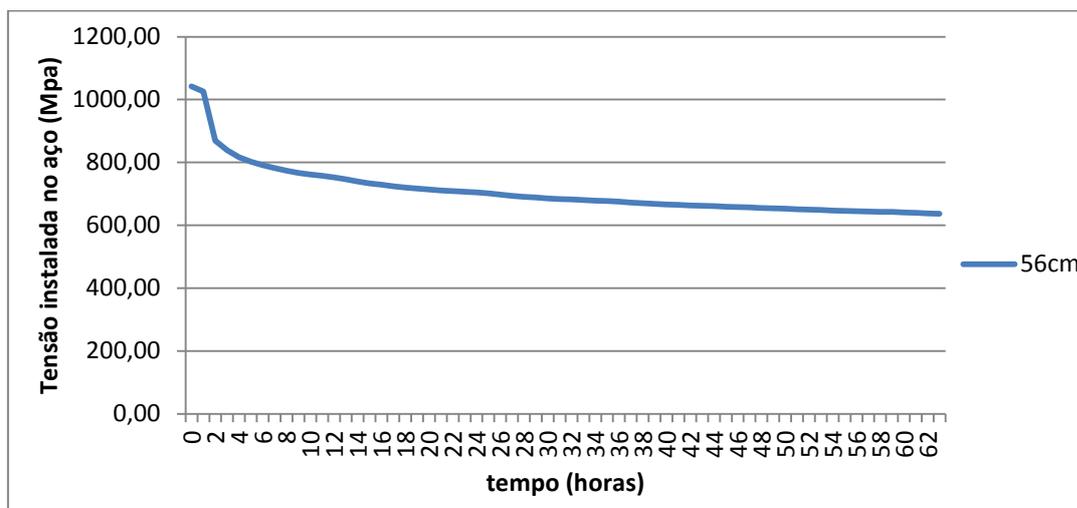


Figura 4.35-Variação da tensão ao longo do tempo

Pela observação do gráfico da Figura 4.35, conclui-se que a tensão estabilizou a cerca de 636MPa, correspondendo a 18kN. Retendo assim cerca de 57% do pré-esforço instalado antes da libertação do macaco.

Em relação à variação da tensão ao longo do tempo, conclui-se que a tensão começou a estabilizar cerca de 56 horas após estar a ensaiar.

- Comparação dos resultados dos provetes 7 e 8

Para melhor interpretação e comparação dos resultados referentes aos dois provetes anteriores pode-se observar o Quadro 4.6.

Quadro 4.6- Comparação de resultados entre Provede 7 e 8

Provetes	Tensão aplicada (Mpa)	%da tensão transmitida			% Afetada de força transmitida devido à colagem do extensómetro	Comprimento de transmissão da força
		L=24cm	L=32cm	L=40cm		
7	1423	52,89%	67,64%	79,44%	19%	41cm
8	1116	48,47%	63,64%	74,51%	14%	44cm

Pela observação de resultados, comparando a percentagem da tensão transferida, conclui-se que estão muito próximas, havendo uma diferença na percentagem devido à colagem do extensómetro que afeta os valores obtidos, sendo que a do provede 7 é maior porque

contabilizou-se um comprimento mais pequeno (40cm), daí este ser mais afetado. Mas como se pode constatar o comprimento de transmissão da força é muito próximo nos dois provetes. Pois o fio de aço além de ter as mesmas características mecânicas, tinha o mesmo diâmetro e o mesmo comprimento, assim como o provete era exatamente igual.

5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Após a realização dos ensaios experimentais dos vários provetes, pode-se analisar a influência da introdução do sistema de pré-esforço e avaliar as suas vantagens. Também é possível comparar os diferentes métodos entre si e com outros trabalhos já elaborados, mais especificamente com resultados obtidos por Moderno (2011), no caso dos ensaios de pré-tensão.

5.1 Diferenças entre Pós-tensão e Pré-tensão

Comparando na generalidade, pelos resultados que foram apresentados, nos casos onde existe libertação do macaco hidráulico, pode-se afirmar que a percentagem de perdas instantâneas devidas à deformação elástica da madeira é maior nos ensaios de pós-tensão, pois o varão utilizado tinha maior diâmetro e tinha uma tensão de rotura menor, mas ao longo do tempo estes conseguem reter maior percentagem do pré-esforço aplicado inicialmente comparativamente com os ensaios de pré-tensão, isto devido ao escorregamento do fio de pré-esforço no ligante. A melhoria de resultados obtida com pré-aquecimento dos materiais sugere ainda que influencie positivamente os resultados.

5.2 Comparação dos resultados dos ensaios de Pós-tensão (Ensaio A e Ensaio B)

Entre os ensaios A e B, apesar de serem ambos de pós-tensão, existe uma grande diferença nas perdas instantâneas. Como já foi explicado, no ensaio A, a deformação da madeira, acompanha o processo de aperto da porca, levando a que as perdas instantâneas sejam muito reduzidas. No ensaio B, a diferença é que quando se liberta o macaco, existirem perdas por deformação elástica da madeira. No Quadro 5.1, pode-se observar a diferença de resultados

Quadro 5.1- Resultados do ensaio A e B

Ensaio	% Perdas instantâneas			% Pré-esforço retido	
	%perdas por deformação elástica da madeira	%perdas pelas porcas de extremidade			
A (2)	4,3%			95,70%	
B(3 e 4)	14,5%	5,5%	4,5%	75,71%	80,80%

No ensaio B, ambos os provetes perderam tensão pelas porcas que se encontravam na extremidade. Em relação à percentagem que cada um retém do pré-esforço inicial, o primeiro sistema é mais eficaz, mas percentagem de pré-esforço retido nos dois provetes do ensaio B tendo em conta as perdas por deformação elástica serem elevadas também mostra ser um sistema de produção em série bastante eficiente.

5.3 Comparação dos resultados dos ensaios de Pré-tensão (Ensaio C)

5.3.1 Comparação dos resultados do Provede 5 e 6

Estes dois provetes, como se pode observar no Capítulo 4, tem exatamente o mesmo esquema de ensaio, mas o facto de ter existido um pré-aquecimento do material (madeira e ligante) no provede 6, levou a uma grande diferença nos resultados, diferença esta para melhor.

Segundo o prontuário da Sika, aumentando a temperatura de resinas epóxi, o tempo de cura diminui e todas resinas testadas revelam melhor comportamento a uma temperatura mais alta.

No Quadro 5.2, pode ser observado a diferença dos resultados destes dois provetes.

Quadro 5.2-Resultados dos provetes

Provetes	% Perdas durante a cura	Perdas instantâneas		% Pré-esforço retido
		% Perdas por deformação elástica da madeira	% Perdas pela aderência cola ao fio	
5	7,20%	3,8%	4,85%	52%
6	2,30%	3,8%	0,16%	64%

Em relação à percentagem de perdas durante a cura, um dos fatores que provavelmente influenciou os resultados, foi o tempo decorrido entre o alongamento do fio e a libertação do dispositivo de tração, ou seja o tempo de cura do ligante. O provede 6 praticamente não teve perdas.

Comparando os dois provetes, as perdas instantâneas relativamente à aderência entre o varão e o fio de aço são bastantes superiores no provede 5. Isto pode ser justificado pela diferença de temperatura do ligante durante a sua aplicação.

Consequentemente, o provede 6 retém maior percentagem do pré-esforço instalado antes da libertação do macaco que o provede 5.

5.3.2 Comparação do Provete 5 e 6 com resultados da Tese de Mestrado Integrado do Cedrico Moderno

Os ensaios destes dois provetes tinham como objetivo confirmar os resultados obtidos por Moderno, C. (2011).

Moderno, estudou dois provetes com o mesmo esquema de ensaio, esses resultados pode-se observar no Quadro 5.3.

Quadro 5.3- Resultados

Provetes	Perdas instantâneas		% Pré-esforço retido
	% Perdas por deformação elástica da madeira	% Perdas pela aderência cola ao fio	
1	4,60%	2,10%	91%
2	4,60%	0,60%	94%

Como se pode observar, os resultados são bastante diferentes, sendo que estes mostram o melhor desempenho do ligante. A grande diferença é principalmente a percentagem de pré-esforço retido, mesmo comparando com o provete 6.

É provável que esta diferença de resultados se deva, por um lado, à perturbação da colagem, provocada pela perda de tensão do macaco hidráulico durante a cura do ligante, a qual nunca foi absolutamente solucionada neste trabalho e, por outro, às diferenças de condições termo-higrômétricas nas quais foram realizados os dois trabalhos. Efetivamente os ensaios de Moderno (2011) foram realizados pelo Verão, com temperaturas médias elevadas e baixa humidade do ar, enquanto estes tiveram lugar em Dezembro, sob baixas temperaturas e humidade elevada. Admite-se que estes aspetos tenham afetado o desempenho da colagem, como já se discutiu anteriormente.

5.3.3 Comparação de resultados do Provete 7 e 8 com resultados da Tese de Mestrado Integrado do Cedrico Moderno (2011)

Tal como algumas comparações apresentadas anteriormente, os ensaios destes dois provetes, tinha como objetivo serem comparados com os resultados obtidos por Moderno (2011) no seu provete 10.

Os provetes 7 e 8, como já foi referido anteriormente, foram estudados com o objetivo de se saber o comprimento de transmissão da força de pré-esforço aplicada ao provete.

No Quadro 5.4, pode-se observar a diferença de resultados dos provetes.

Quadro 5.4-Resultados

Provete	Tensão aplicada (MPa)	% Afetada de força transmitida devido à colagem do extensômetro	Comprimento da transmissão da força
7	1423	19%	41cm
8	1116	14%	45cm
10	1410	40%	33cm

Pela observação do Quadro 5.4, comparando os resultados do provete 7 e 8 existe uma grande discrepância, pois a percentagem afetada devido à colagem do extensômetro é muito superior no provete 10, o que condiciona muito mais os resultados. Como tal os resultados obtidos por Moderno, não são viáveis.

6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Após a realização dos ensaios experimentais dos vários provetes e da análise da influência da introdução do sistema de pré-esforço e das suas mais-valias, podem ser retiradas várias conclusões.

No ensaio A, a aplicação do pré-esforço é realizada com recurso ao aperto de porcas roscadas nas extremidades do varão, o que constitui uma alternativa viável e vantajosa, na medida em que são reduzidas as perdas instantâneas, isto porque, a compressão elástica da madeira acompanha o processo de aperto da porca.

No ensaio B, apesar de o princípio ser o mesmo do ensaio A, devido a existir uma libertação do macaco hidráulico, existiram perdas por deformação elástica da madeira. Este ensaio permitiu mostrar a aplicação de pré-esforço simultaneamente em mais que um provete e mostrou ser um método eficiente. É de salientar que se deve ter algum cuidado no processo de aperto das porcas nas extremidades: apenas se deve ajustar sem exercer muita força, a fim de evitar um aumento de tensão que possa levar à rotura.

No ensaio C, uma das conclusões tiradas é a influência da temperatura ambiente e da temperatura do material utilizado (ligante Sikadur 30 Normal e peças de madeira), durante a preparação do ensaio, que como se pode observar no Capítulo 5, pela comparação de resultados existiu uma grande diferença entre o provete 5 e o provete 6, mostrando que o aumento da temperatura da resina durante a aplicação levou a um melhor desempenho desta. Também foi referenciado anteriormente que a perturbação da colagem durante a cura do ligante provavelmente influenciou negativamente os resultados. Comparando os resultados deste trabalho como os resultados obtidos por Moderno (2011), confirma-se mais estas duas conclusões, pela diferença de condições termo-higrómicas nas quais foram realizados os dois trabalhos. Em relação aos provetes em que se tinha como objetivo a determinação do comprimento da transmissão da força conclui-se, que o facto de se diminuir a força aplicada não influenciou significativamente o comprimento de transmissão porque os provetes eram exatamente iguais.

O tema aqui desenvolvido encontra-se ainda numa fase muito inicial e requer bastante estudo. Os resultados obtidos são muito promissores, levando a um desenvolvimento de trabalhos futuros, tais como:

- Em relação ao ensaio A, dado ao seu bom desempenho, aplicar o mesmo sistema dos provetes em elementos estruturais (vigas), de forma a lhes aumentar a capacidade resistente, principalmente em relação a resistência à flexão. Também seria interessante, aplicar o pré-esforço da mesma maneira, mas em dois varões excêntricos.
- Em relação ao ensaio B, testar provetes com maior comprimento para avaliar se mantém o mesmo desempenho. Tal como no ensaio A, seria interessante aplicar o pré-esforço em dois varões excêntricos.
- Em relação ao ensaio C, tendo em conta que os resultados obtidos não confirmam os resultados obtidos por Moderno, seria interessante repetir este esquema de ensaio, para posteriormente ser aplicado o pré-esforço a elementos estruturais. Tal como nos outros dois tipos de ensaio, testar a aplicação de pré-esforço em dois fios de aço, excêntricos.
- Outros ligantes com funções estruturais e/ou com diferentes bases químicas, podem também ser estudados.
- Em relação a qualquer um dos ensaios, seria interessante e importante, avaliar as perdas diferidas.
- Realizar um maior número de provetes e ensaios para encontrar padrões de comportamento e confirmar as conclusões retiradas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

Balseiro, A. (2007) “Reforço e a reabilitação de vigas de madeira por pré-esforço com laminados FRP” Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Reabilitação do Património Edificado, da Universidade de Aveiro.

Barroso, D., Negrão, J., Cruz, P. (2004). “ Avaliação Comportamento de Vigas de Madeira Lamelada Pré-esforçada”. CIMAD 04 – 1ºCongresso Ibérico, A madeira na construção,pp.109-112.

Barroso, D., (2012) “Modelação Numérica e Computacional de vigas de Madeira Pré-Esforçadas”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra

Bohannon, B. (1974).” Time - Dependent Characteristics of prestressed wood beams”, U.S. Department of agriculture, Forest service, Forest Products Laboratory - Madison, Wisconsin.

Borri, A., e Corradi, M. (2011) “Strengthening of timber beams with high strength steel cords”. Civil and Environmental Engineering Department, University of Perugia

Brunner, M. e Engels, I. (2006). “Special adhesive for the production of ductile glulam beams”, 9th World Conference on Timber Engineering, Portland, USA.

Buell, Ted W. e Saadatmanesh, H. (2005). “Strengthening Timber Bridge Beams Using Carbon Fiber”.ASCE- Journal of structural engineering.

CEN (2003) EN 1995-1-1. Eurocode 5 - “Design of timber structures – Part 1-1: General–Common rules and rules for buildings”.

Custódio, J., Cruz, H., Negrão, J., Broughton, J., “Thermal stability of epoxy and polyurethane adhesives and bonded joints used in the rehabilitation of tomber structures”

De Luca, V., Marano, C. (2011). “Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars”. Elsevier - Construction and Building Materials, 30 (2012), pp. 206–217.

Dias da Silva, V. (1995). “Mecânica e Resistência dos Materiais”. Ediliber Editora, Coimbra.

Dias, S., Branco, J., Cruz, P. (2006). “Compósitos de CFRP unidireccionais no reforço de vigas de madeira lamelada colada”. Revista International Construlink. ISBN: 1645-5576. 4:11, pp 25-33.

Dias, A. et al (2009), “Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira”, Verlag Dashöfer Portugal

Dias, A. (2009/2010). “Estruturas de madeira e alvenaria”. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Galloway, T., Fogstad, C., Dolan, J., Puckett, J. (1996). “Initial tests of Kevlar prestressed timber beams”. National conference on wood transformation structures. FPL-GTR-94.USDA, Forest Service, Forest Products Lab

IPQ, NP 4305:1995. “Madeira Serrada de Pinheiro bravo para Estruturas. Classificação Visual”.

IPQ (2009), NP EN 1993-1-1. “Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edificios”.

Kim, Yail j., Harries, Kent A. (2010). “Modeling of timber beams strengthened with various CFRP composites”. Engineering Structures 32, 3225-3234.

Leitão, Daniela Rodrigues., (2012). “Viabilidade do uso de chapas de aço coladas para reforço de vigas de madeira”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Martins, G. (2009). “Comportamento de Elementos Estruturais Compósitos baseados em Madeira” Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Moderno, C. (2011). “Exequibilidade da Aplicação de Pré-esforço por Pré-tensão a Elementos de Madeira”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra

Ritter, M., Geske, E., Mason, L., McCutcheon, W., Moody, R. and Wacker, J. (1990). "Performance of Stress-Laminated Bridges". Wood Design Focus, Volume 1, Number 3, pp.12-16.

Rodrigues, J. (2011). "Exequibilidade da Aplicação de Pré-esforço por Pós-tensão a Elementos de Madeira". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Sika Portugal, S.A., Fichas técnicas.

Simões, J. (2008). "Sistemas de Ancoragem de Fio de Aço em Madeira". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Troitsky, M.S. (1990), "Prestressed steel bridges: theory and design". Library of congress cataloging-in-publication data.

ANEXO

A. Variação da tensão instalada ao longo do tempo do provete 7

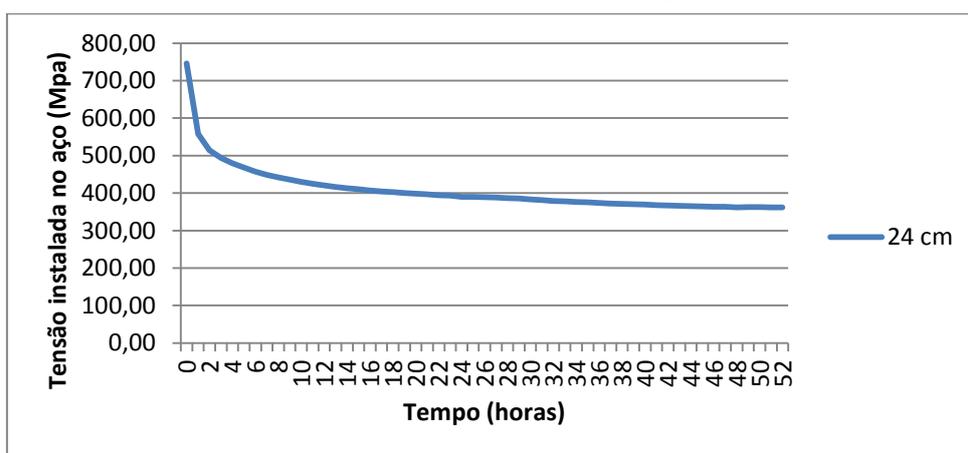


Figura A- Variação da tensão ao longo do tempo do Provete 7

B. Variação da tensão instalada ao longo do tempo do provete 8

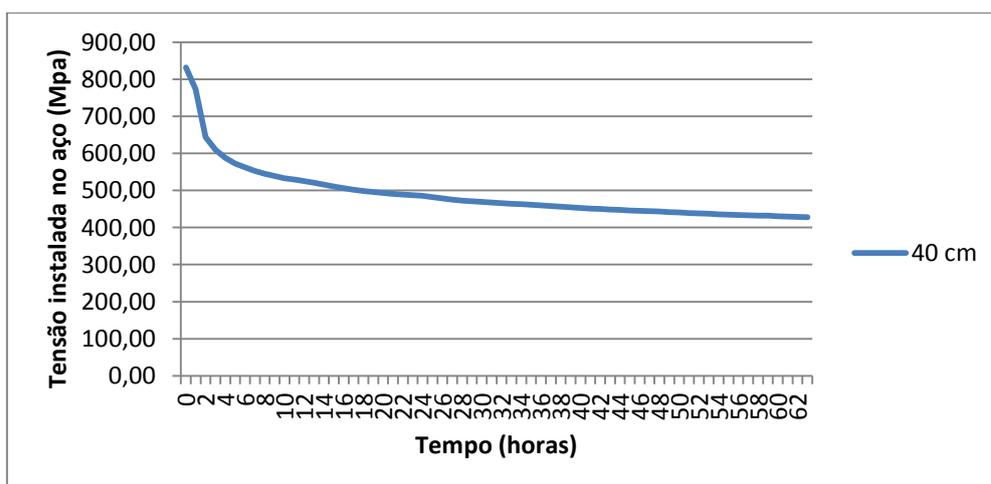


Figura B - Variação da tensão ao longo do tempo Provete 8