

SISTEMA DE PRÉ-ESFORÇO DE VARÕES DE GFRP PARA ESTRUTURAS DE BETÃO

PAULO JORGE PARREIRA PINHEIRO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Luís Filipe Pereira Juvandes

Co-Orientador: Professor Doutor Joaquim de Azevedo Figueiras

JUNHO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas e entidades que de uma forma directa ou indirecta contribuíram para a realização deste trabalho, desejo aqui expressar o meu profundo reconhecimento e agradecimento.

Ao Professor Luís Juvandes, orientador desta tese, pela abertura de espírito revelada desde o primeiro instante para conduzir todo o trabalho da melhor forma possível. Quero agradecer a sua inextinguível disponibilidade, dedicação, paciência e apoio na superação dos diversos obstáculos assim como os ensinamentos técnicos e bibliográficos transmitidos enquanto meu professor. Pretendo, ainda, expressar a minha profunda gratidão pela sua integridade, qualidade como homem, profissional e cidadão e, principalmente, pela amizade já que sem isso não seria possível realizar da mesma maneira este importante trabalho que resulta no culminar de um objectivo académico a que me propus.

Ao Professor Joaquim Azevedo Figueiras, co-orientador desta tese, pelos ensinamentos transmitidos sobre o Betão Armado e Pré-esforçado e por ter facultado o uso dos recursos disponíveis no LABEST para a realização do programa experimental desenvolvido neste trabalho.

Ao Professor Miguel Ferraz por colocar à disposição o seu tempo e o seu modelo computacional designado “Evolution” com vista a modelação e previsão do comportamento da viga experimental.

Ao Professor Luís Esteves, do Departamento de Engenharia Mecânica, por colocar à disposição a cola Araldite 420 e pelas ideias avançadas para a fixação das cabeças de amarração do tubo de GFRP.

À Secção de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da FEUP, pelos meios colocados à minha disposição no decurso desta tese.

Aos laboratórios LABEST (Secção de Estruturas) e LEMC (Secção de Materiais de Construção) pelos meios colocados à disposição para a realização da significativa componente experimental desenvolvida ao longo da dissertação. Nesses, agradeço a colaboração dos auxiliares dos laboratórios que tornaram possível a realização do trabalho experimental em especial a Eng^a Paula Silva, a Eng^a Patrícia Guedes Pereira, ao Sr. Alberto Monteiro, ao Sr. Cláudio Ferraz e ao Sr. Gilberto Costa.

Às Oficinas de Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, pela imediata disponibilidade para a realização da maquinação das cabeças de aperto e de reacção que integram o sistema de pré-esforço de GFRP.

À Fibrolux, na pessoa de Sara Martins, empresa Alemã que disponibilizou o primeiro grupo de perfis tubulares de GFRP em tempo útil para a realização da campanha experimental incluídas nesta dissertação.

À Socitrel, na pessoa do Eng^o Macedo Morais, empresa que facultou os varões de aço de pré-esforço para a constituição do sistema de pré-tensão do cabo de GFRP.

À Prince Fibre Tech bv, na pessoa de Anton Nijkamp, empresa Holandesa que facultou o segundo grupo de perfis tubulares de GFRP para a realização da próxima campanha experimental a integrar no futuro programa de investigação.

RESUMO

O betão armado pré-esforçado é uma técnica em que se comprime o betão antes de lhe serem aplicados esforços de serviço. O betão previamente comprimido tem a capacidade de melhor resistir a esforços de tracção. Com esta técnica consegue-se construir estruturas com um maior vão, menores flechas e retardar a fendilhação. Para se conseguir o estado inicial de compressão, aplicam-se cabos no interior de bainhas que, depois do betão curado, são tencionados e fixados nas extremidades ou injectados ao longo do seu comprimento, de forma a exercerem uma força de compressão sobre a peça de betão. Contudo, as técnicas actuais de pré-esforço são de difícil execução, exigem pessoal qualificado e equipamentos dispendiosos.

O presente trabalho procura desenvolver uma ideia subjacente à criação de um varão pré-tensionado e auto-equilibrado que possa ser aplicado em obra, tal como um varão vulgar, mas que depois do betão ganhar resistência seja possível libertar a pré-tensão do varão para transmitir uma força de compressão ao betão, ficando o conjunto pré-esforçado. Para dar corpo a essa ideia discutem-se os princípios de funcionamento do hipotético varão pré-tensionado, os materiais possíveis para a sua concretização, com particular incidência nos tubos compósitos de GFRP e os critérios para a constituição do mecanismo de pré-tensão do sistema.

Depois de seleccionado o tubo de GFRP, de entre alguns disponíveis no mercado, definiu-se o critério para a execução do cabo de pré-esforço a partir de um mecanismo baseado em sistemas de ancoragens (cabeça de aperto e cabeça de reacção), um varão de aço de pré-esforço e do próprio tubo de GFRP. No sentido de avaliar o comportamento do cabo de GFRP (conhecer as perdas de esforços e de variação de deformação das ancoragens) quando é submetido a uma pré-tensão da ordem de 60% da capacidade resistente do material, decidiu-se fazer um teste que consiste em pré-tensionar um tubo de GFRP e posteriormente fixá-lo pelas suas extremidades a um sistema de apoio indeformável, disponível no LABEST. O sistema foi monitorizado durante pelo menos 1 mês (até 37 dias) de forma a permitir tirar ilações relativamente à variação da extensão do tubo, do escorregamento das cabeças de amarração e do valor da força efectiva no sistema pré-esforçado (valor da tensão no tubo), para que seja possível identificar fenómenos de relaxação.

Seguidamente, procedeu-se à execução de uma viga de betão armado pré-esforçada com o modelo de cabo estudado e submeteu-se a um ensaio de flexão em 3 pontos, com o intuito de se avaliar o desempenho da estrutura armada em fase de serviço. Os resultados obtidos são comentados e interpretados por uma análise simples e uma análise pelo modelo numérico EVOLUTION de modo a extraírem-se ilações sobre a previsão do comportamento da viga pré-esforçada em serviço e até à ruína. Este modelo estimou os valores da carga P_{cr} , carga de início de cedência da armadura, carga de início de esmagamento do betão e carga e modo de ruína do modelo avaliado.

Por último, as conclusões do trabalho têm como objectivo evidenciar os principais aspectos obtidos como resultados neste trabalho e evidenciar outros a colmatar pela investigação em futuros desenvolvimentos.

Palavras-Chave: técnica de pré-esforço, tubo de GFRP pré-tensionado, compósitos reforçados com fibra de vidro (GFRP), viga de betão armado pré-esforçada.

ABSTRACT

The pre-stressed concrete is a technique that consists of compressing the concrete before service efforts are applied. Concrete previously tablet has the ability to better resist the efforts of traction. With this technique you can construct structures with a larger empty space, smaller arrows and retard cracking.

To achieve the initial compression state cables must be applied inside sheaths, which, after the concrete is cured, are tensed and fixed in the ends or injected along its length so that they can exert a force of compression on the piece of concrete. However the current techniques of pre-stressing are difficult to fulfill, they require qualified staff and expensive equipment.

This work seeks to develop an idea behind the creation of a pre-tensioned and self-balanced rod that can be applied to work as a vulgar rod, but after gaining consistence may be possible to free the pre-tension on it to transmit a compressive force to the concrete, remaining pre-stressed all the whole. To give substance to this idea it must be discussed the operating principles of the hypothetical pre-tensioned rod, the possible materials for its fulfillment with the particular focus on the GFRP (reinforced glass fiber polymer) composite tubes and on the rules to constitute the mechanism of the pre-tension of the system.

After selecting the GFRP tube among some commercially available, it was defined the criterion for implementation of the pre-stressing cable, taking into account a mechanism based on anchoring systems (press head and reaction head), a pre-stressed steel rod and the GFRP tube itself. In order to assess the performance of the GFRP cable (knowing losses of efforts and changes in anchoring deformations whenever submitted to a pre-tension of about 60% of the resistant capacity of the material, it was decided to make a test consisting on pre-tensioning a GFRP tube and then fix it by its ends to an indeformable support system, available in LABEST. This system was monitored for at least one month (until 37 days) in order to be able to draw conclusions regarding the variation of the length of the tube, the slip of the anchoring heads and of the value of the effective force in the pre-stressed system (value of the tension on the tube) so that you can identify relaxation phenomena.

After that it was made a pre-stressed armed concrete beam, following the studied cable model and it was submitted to a bending test in three points, with the purpose of evaluating the performance of the armed structure during a service phase. The results are discussed and interpreted by a simple analysis and an analysis by the numerical model EVOLUTION in order to draw up conclusions on the prediction of the performance of the pre-stressed beam in service until its ruin. This model estimated the values of the cracking load, early yielding load of the armor, early crushing load of the concrete, and load and mode of ruin of the evaluated model.

Finally, the conclusions of this work intend to highlight the main aspects obtained as results of this study and to evidence others ones to be done by research in future developments.

KEYWORDS: pre-stress technique, pre-stressed GFRP tube, glass fiber reinforced polymer (GFRP), pre-stressed reinforced concrete beams.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE QUADROS	xi
SIMBOLOGIA	xiii

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 O PRÉ-ESFORÇO NA ACTUALIDADE	1
1.2 OBJECTIVOS DO TRABALHO	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	2

2 TÉCNICA ALTERNATIVA DE PRÉ-ESFORÇO PARA BETÃO ARMADO	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO	5
2.3 MATERIAIS COMPATÍVEIS	7
2.3.1 FLUÍDO/AÇO	7
2.3.2 AÇO/AÇO	7
2.3.3 GFRP/AÇO	8
2.4 PERFIS COMERCIAIS DISPONÍVEIS	8
2.5 MECANISMO DE PRÉ-TENSIONAMENTO	9
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	9

3 CARACTERIZAÇÃO DOS TUBOS DE GFRP	11
3.1 INTRODUÇÃO	11
3.2 DEFINIÇÃO DO MODELO DE TRACÇÃO	11
3.2.1 MODELO A	12
3.2.2 MODELO B	13
3.3 PROVETES E MATERIAIS	14
3.4 ENSAIOS E ANÁLISE DE RESULTADOS	15
3.5 PROPRIEDADES FÍSICAS A RETER NO TRABALHO	18

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	18
4 ESTUDO DE UM CABO DE PRÉ-ESFORÇO	21
4.1 INTRODUÇÃO	21
4.2 DEFINIÇÃO DO MODELO	21
4.3 CÁLCULO DO VALOR DE PRÉ-ESFORÇO	23
4.4 FASES DE PREPARAÇÃO E APLICAÇÃO DE UM CABO	24
4.5 MONITORIZAÇÃO DE UM CABO EM LABORATÓRIO	25
4.5.1 INTRODUÇÃO	25
4.5.2 INSTRUMENTAÇÃO	25
4.5.3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	27
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
5 VIGA DE BETÃO PRÉ-ESFORÇADO	33
5.1 INTRODUÇÃO	33
5.2 GEOMETRIA E ARMADURA	33
5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	34
5.3.1 BETÃO	34
5.3.2 AÇO	35
5.3.3 GFRP	35
5.4 PREPARAÇÃO DO CABO	36
5.5 PREPARAÇÃO DA VIGA, ENSAIO E RESULTADOS	38
5.5.1 APLICAÇÃO DO PRÉ-ESFORÇO	39
5.5.2 ENSAIO DE CARGA	42
5.6 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO	46
5.6.1 ANÁLISE SIMPLES	46
5.6.2 ANÁLISE PELO PROGRAMA EVOLUTION	48
5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
6 CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	55
6.1 CONCLUSÕES GERAIS	55
6.2 FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	56
7 REFERÊNCIAS	59
ANEXO: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	A

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1– Princípio do pré-esforço.....	1
Figura 1.2 – Princípio do pré-esforço.....	2
Figura 2.1– Secção transversal.....	6
Figura 2.2 – Secção longitudinal de um hipotético varão pré-tensioando.	6
Figura 2.3 – Equilíbrio de forças.	6
Figura 2.4 – Equilíbrio de forças.	7
Figura 2.5 – Mecanismo de pré-tensionamento.....	9
Figura 3.1 – Esquema do modelo A (dimensões em mm).....	12
Figura 3.2 – Montagem do modelo A.....	13
Figura 3.3 – Esquema do modelo B (dimensões em mm).....	13
Figura 3.4 – Montagem do modelo B.....	14
Figura 3.5 – Colas usadas no trabalho.	15
Figura 3.6 – Vista geral do ensaio de tracção uniaxial dos modelos de GFRP.....	15
Figura 3.7 – Comportamento do provete 1	16
Figura 3.8 – Ruptura dos provetes 1 e 2.....	16
Figura 3.9 – Comportamento do provete 2	16
Figura 3.10 – Comportamento do provete 3	16
Figura 3.11 – Ruptura do provete 3	16
Figura 3.12 – Comportamento do provete 4	17
Figura 3.13 – Ruptura do provete 4	17
Figura 3.14 – Comportamento do provete 5	17
Figura 3.15 – Ruptura do provete 5	17
Figura 3.16 – Comportamento do provete 6	17
Figura 3.17 – Ruptura do provete 6	17
Figura 4.1 – Esquema e ilustrações do cabo de pré-esforço e do mecanismo de aperto (medidas em mm)	22
Figura 4.2 – Esquema e ilustrações do cabo de pré-esforço e do mecanismo de aperto (medidas em mm)	24
Figura 4.3 – Sistema de apoio	25
Figura 4.4 – Posicionamento dos sensores de monitorização do varão	26
Figura 4.5 – Aspecto geral do sistema de aquisição dos sinais dos sensores.....	27
Figura 4.6 – Diagrama de Extensão vs Tempo relativo a 3 extensómetros (37 dias).....	28
Figura 4.7 – Diagrama de Deslocamentos vs Tempo medidos pelos LVDT's (37 dias).	28
Figura 4.8 – Diagrama de Força vs Tempo instalada na célula de carga (37 dias).	28
Figura 4.9 – Diagrama de Extensão vs Tempo relativo a 3 extensómetros (3 horas).....	29
Figura 4.10 – Diagrama de Deslocamentos vs Tempo medidos pelos LVDT's (3 horas).	29
Figura 4.11 – Diagrama de Força vs Tempo instalada na célula de carga (3 horas).....	30

Figura 5.1 – Geometria e armadura da viga.	34
Figura 5.2 – Aplicação do revestimento.	36
Figura 5.3 – Ruptura do tubo de GFRP.....	36
Figura 5.4 – Provete submetido ao ensaio de tracção.....	37
Figura 5.5 – Ensaio do provete construído a partir do tubo que rompeu.....	37
Figura 5.6 – Tubo de GFRP revestido com resina Bettor Resin 55 e areia.....	38
Figura 5.7 – Cabo e armadura ordinária utilizados na viga.....	39
Figura 5.8 – Aspecto final da cofragem e do traçado do cabo do modelo experimental.	39
Figura 5.9 – Esquema de instrumentação da fase de pré-esforço.	40
Figura 5.10 – Aspecto geral do modelo experimental no pórtico de ensaio.	40
Figura 5.11 – Aplicação do pré-esforço.....	41
Figura 5.12 – Deslocamentos medidos na altura de aplicação do pré-esforço.	41
Figura 5.13 – Cálculo do deslocamento a meio vão.	42
Figura 5.14 – Aspecto geral do ensaio de flexão em 3 pontos.	43
Figura 5.15 – Esquema de instrumentação do ensaio de flexão.	43
Figura 5.16 – Diagramas “carga aplicada vs deslocamento vertical” até 7,5kN.....	44
Figura 5.17 – Padrão de fendilhação registado no ensaio.....	45
Figura 5.18 – Ciclo de carga-descarga.	45
Figura 5.19 – Critérios para a discretização da viga.	48
Figura 5.20 – Curva de tensão vs extensão (só tracção) do cabo de GFRP.....	48
Figura 5.21 – Curva de tensão vs extensão (tracção e compressão) do betão.	49
Figura 5.22 – Curva de tensão vs extensão (tracção e compressão) do aço da armadura ordinária. .	49
Figura 5.23 – Diagramas “carga aplicada vs deslocamento vertical” dos modelos numérico e experimental.	50
Figura 5.24 – Diagramas de evolução da “tensão normal vs extensão” nos materiais, na secção a meio vão e para as fibras mais comprimidas e mais traccionadas.	51
Figura 5.25 – Ciclo carga-descarga experimental vs numérico.	52

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Propriedades mecânicas de varões de FRP (Reis, 2009).....	8
Quadro 3.1 – Definição dos provetes para ensaios de tracção.	14
Quadro 3.2 – Resultados e observações dos ensaios de tracção nos modelos A e B.	16
Quadro 3.3 – Resumo dos principais resultados dos ensaios de tracção	18
Quadro 3.4 – Propriedades mecânicas do GFRP estimadas.	18
Quadro 3.5 – Propriedades médias fornecidas pela Fibrolux.....	19
Quadro 4.1 – Valores das grandezas a que o varão fica sujeito para diferentes percentagens de aplicação em relação à ruptura.	23
Quadro 4.2 – Extensões mediadas no final do aperto e após aplicação.....	30
Quadro 5.1 – Características do betão aos 28 dias.....	34
Quadro 5.2 – Características médias do aço.....	35
Quadro 5.3 – Características média do GFRP.	35
Quadro 5.4 – Características do tubo sem e com revestimento.....	38
Quadro 5.5 – Deslocamentos devidos ao pré-esforço.....	42
Quadro 5.6 – Estimativa de cargas pela análise simples.	47
Quadro 5.7 – Valores estimados pela análise numérica.	50

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Siglas:

AFRP - polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de aramida

CFRP - polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de carbono

ELS - estado limite de serviço

ELU - estado limite último

FRP - família dos polímeros reforçados com fibras contínuas

GFRP - polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de vidro

LABEST- Laboratório de Betão e Comportamento Estrutural

LEMC – Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção

LVDT – Transdutor de deslocamentos (Linear Variable Differential Transformer)

Notações Escalares Latinas (Minúsculas)

d - diâmetro interior do tubo de fibra de vidro [mm]

f_{cd} - resistência de cálculo à compressão do betão [MPa]

f_{ck} - resistência característica à compressão do betão [MPa]

f_{cm} - resistência média à compressão do betão [MPa]

f_{cm}^{cub} - resistência média à compressão do betão (cubos) [MPa]

f_{ctm} - resistência média à tracção do betão [MPa]

f_f - tensão instalada na armadura de FRP

$f_{fu,m}$ - resistência à tracção média do varão FRP

f_{sum} - tensão última resistente do aço [MPa]

f_{sym} - tensão média de plastificação do aço [MPa]

m – relação E_{sm}/E_{cm}

Notações Escalares Latinas (Maiúsculas)

$A_{Aço}$ - área de aço utilizado na pré-tensão

A_c - área da secção de betão

A_f - área da armadura de FRP [mm²]

A_s - área de armadura de aço [mm²]

D - diâmetro exterior do tubo de fibra de vidro [mm]

E_{cm} - módulo de elasticidade médio do betão [MPa]

E_{fm} - módulo de elasticidade médio à tracção longitudinal do FRP [MPa]

E_s - módulo de elasticidade do aço [MPa]

E_{sm} - módulo de elasticidade médio do aço [MPa]

$F_{Aço}$ - Força instalada no aço de pré-tensão [kN]

F_{GFRP} - Força instalada no tubo de GFRP [kN]

I - momento de inércia [mm⁴]

L - comprimento do tubo de GFRP [m]

M_{cr} - momento de fendilhação [N.mm]

M_n - momento nominal resistente [N.mm]

M_{Rd} - momento resistente de cálculo em Estado Limite Último [kN.m]

M_{sd} - momento aplicado em Estado Limite Último [kN.m]

Notações Escalares Gregas

Δl – variação de comprimento [mm]

ε_c - extensão do betão [‰]

ε_{c2} - extensão ao ser atingida a resistência máxima [‰]

ε_{cu} - extensão última do betão [‰]

ε_f - extensão da armadura de FRP [‰]

ε_{fu} - extensão de rotura de cálculo do FRP [‰]

$\varepsilon_{fu,m}$ - extensão de rotura média FRP [‰]

$\varepsilon_{su,m}$ - extensão de rotura média do aço [‰]

$\sigma_{Aço}$ – tensão instalada no aço de pré-tensão [Mpa]

σ_{Efm} - desvio padrão do modo de elasticidade do FRP

1

INTRODUÇÃO

1.1 O PRÉ-ESFORÇO NA ACTUALIDADE

O betão apresenta um bom comportamento à compressão, mas a tracção à sua resistência é bastante fraca, situa-se próxima de 10% da resistência à compressão. Quando queremos suportar esforços de tracção é necessário utilizar uma armadura capaz de aguentar estes esforços. O aço é actualmente o material mais utilizado para essa função. Mas para o aço entrar em funcionamento são necessárias deformações que podem levar ao incumprimento dos deslocamentos impostos em serviço, bem como surgimento de fissuras (Leonhardt, 1979).

O pré-esforço é uma técnica capaz de solucionar parte dos problemas do betão armado. Esta técnica induz uma pré-compressão no betão, melhorando depois o seu desempenho quando sujeito a esforços de tracção (princípio ilustrado na Figura 1.1). Esses esforços de tracção numa determinada secção podem acontecer por fenómenos de flexão ou tracção pura.

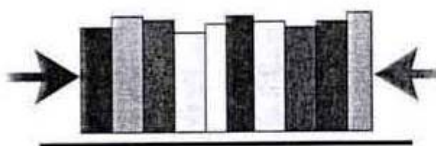


Figura 1.1– Princípio do pré-esforço.

Há dois métodos de aplicar o pré-esforço (Figura 1.2): por pré-tensão ou pós-tensão (Figueiras, 1993). O primeiro caso é usado nas vigotas pré-fabricadas utilizadas em lajes de betão armado aligeiradas. Este processo de fabrico de peças pré-fabricadas com pré-tensão, consiste em pré-tensionar cordões de elevada resistência num molde que será posteriormente betonado. Após o betão adquirir determinada resistência, os cordões são libertados do sistema de tensionamento, transmitindo uma compressão ao betão. A técnica pós-tensão é aplicada *in situ*. Na preparação da armadura ordinária são posicionados uns tubos apropriados com cabos no seu interior. Estes tubos têm a designação de bainhas. O traçado das bainhas pode ser recto ou uma curva com uma determinada função. É o projectista quem define esse traçado. Depois de o betão ganhar uma determinada resistência, os cabos são traccionados com recurso a macacos hidráulicos, e posteriormente fixados à peça. Podem ser utilizadas duas soluções distintas de fixação: pré-esforço aderente ou não aderente. No caso do pré-esforço aderente a bainha é injectada com calda de cimento, ficando o cabo aderente à peça em todo o seu comprimento. No pré-esforço não aderente o cabo apenas é fixo nas extremidades.

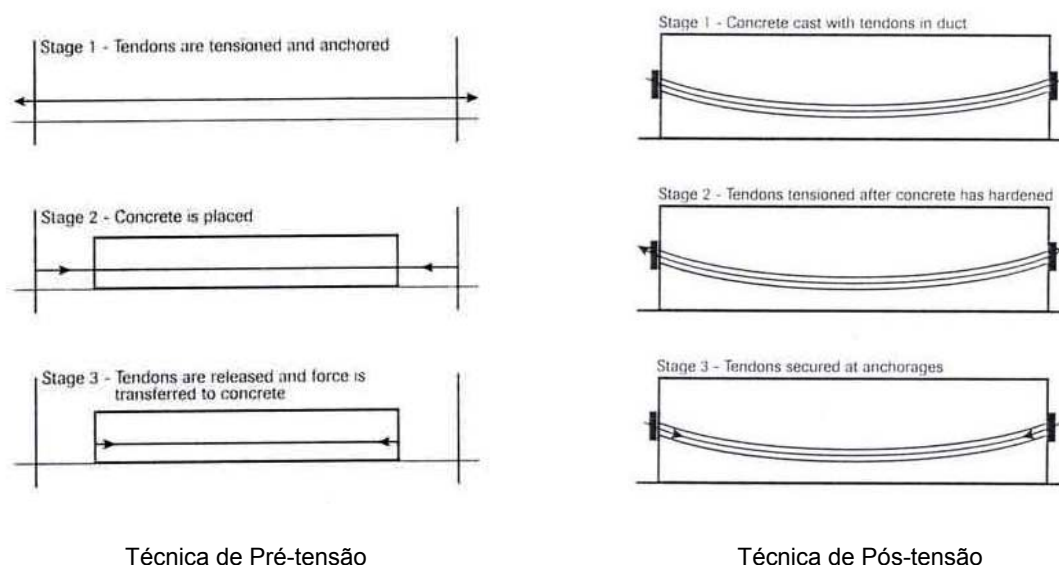


Figura 1.2 – Princípio do pré-esforço.

As vantagens do pré-esforço são conhecidas e relatadas em vários documentos de referência (Leonhardt, 1979) (Figueiras, 1993). No entanto, as técnicas actuais são de difícil execução, exigem pessoal qualificado e equipamentos dispendiosos, o que faz com que não seja utilizado em pequenas obras.

1.2 OBJECTIVOS DO TRABALHO

Neste trabalho, tirando partido de novos materiais, pretende-se desenvolver uma técnica de pré-esforço que seja económica e fácil de aplicar. Não se tenciona competir com os sistemas actuais de pré-esforço, mas sim criar um novo sistema que possa ser usado em situações em que não justifique o uso das técnicas tradicionais de pré-esforço. Este sistema poderia ser usado em pequenas obras tais como moradias, piscinas e pequenos muros de contenção.

Para se atingir estes objectivos é necessário detalhar o princípio de funcionamento desta técnica alternativa de pré-esforço, seleccionar os materiais constituintes, caracterizar o cabo concebido, avaliar a sua exequibilidade prática, perceber o comportamento do cabo misto no tempo e o seu desempenho numa peça de betão armado.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

No sentido de cumprir os objectivos anteriormente traçados, o presente documento encontra-se organizado em 6 capítulos, referências e anexos. O Capítulo 1 introduz a necessidade de uma nova técnica bem como os objectivos do presente trabalho. No Capítulo 2 discute-se sobre o surgimento da ideia e da técnica que permite a sua concretização. Neste capítulo fica já definido o material com que se irá trabalhar (Tubo de GFRP e varão de aço). No Capítulo 3 faz-se a caracterização dos tubos de GFRP e estuda-se a colagem das extremidades. No capítulo 4 desenvolve-se um teste que consiste em pré-esforçar um tubo de GFRP e posteriormente fixá-lo pelas suas extremidades. O sistema foi monitorizado de forma a recolher os valores da força e da extensão no GFRP, não só na altura de aplicação, mas também durante o máximo período para que seja possível identificar fenómenos de

relaxação. No Capítulo 5 procede-se à execução de uma viga de betão armado pré-esforçada com o modelo de cabo estudado com o intuito de se avaliar o desempenho da estrutura armada em fase de serviço. O Capítulo 6 descreve as conclusões do trabalho que têm como objectivo evidenciar os principais aspectos obtidos como resultados neste trabalho e evidenciar outros a colmatar pela investigação em futuros desenvolvimentos. O Anexo A1 resume as fichas técnicas dos diferentes tipos de fabricantes que foram obtidas ao longo do trabalho de pesquisa.

2

TÉCNICA ALTERNATIVA DE PRÉ-ESFORÇO PARA BETÃO ARMADO

2.1 INTRODUÇÃO

Em termos gerais, a técnica de pré-esforço por pré-tensão, consiste em pré-tensionar varões de elevada resistência num molde pré-estabelecido que será posteriormente betonado. Após o betão adquirir determinada resistência, os cordões são libertados do sistema de tensionamento, transmitindo uma compressão ao betão (Figueiras, 1993). Esta técnica é bastante mais simples do que a de pós-tensão. A ideia subjacente ao presente trabalho é a de estudar uma técnica parecida com essa que seja possível aplicar em obra. Isto pode parecer tarefa impossível, já que em obra é impossível garantir um sistema de auto-equilíbrio das reacções nas extremidades do varão para que este possa ser pré-tensionado. Assim, surgiu a ideia de desenvolver um varão pré-tensionado e auto-equilibrado. Um varão que possa ser aplicado em obra tal como um varão vulgar, mas que depois do betão ganhar resistência seja possível libertar a pré-tensão do varão para transmitir uma força de compressão ao betão, ficando o conjunto pré-esforçado.

Neste capítulo, procura-se dar corpo a essa ideia através da discussão dos princípios de funcionamento do hipotético varão pré-tensionado, dos materiais possíveis para a sua concretização, com particular incidência nos perfis compósitos de GFRP e dos critérios para a constituição do mecanismo de pré-tensão do sistema. Numa breve pesquisa na literatura internacional não foi encontrada alguma publicação que reportasse a um sistema semelhante ao agora em estudo.

2.2 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

A única forma de conseguir um varão pré-tensionado auto-equilibrado é este ser constituído por dois elementos, um traccionado e outro comprimido conforme se ilustra na Figura 2.1. O elemento traccionado terá obrigatoriamente de ser o elemento exterior para na implementação numa peça de betão armado, poder transferir esforços por aderência ao betão e constituir-se um sistema pré-esforçado.

Nas extremidades, o elemento traccionado envolve o elemento comprimido de forma a garantir a transferência de esforços. A Figura 2.2 representa um corte longitudinal de um hipotético varão nestas condições.

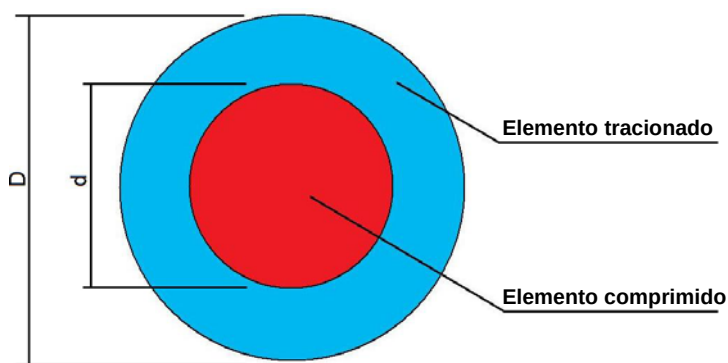


Figura 2.1– Secção transversal.

Nas extremidades o elemento tracionado envolve o elemento comprimido de forma a garantir a transferência de esforços. A Figura 1.2 representa um corte longitudinal.



Figura 2.2 – Secção longitudinal de um hipotético varão pré-tensionando.

A força que o elemento comprimido exerce sobre o tracionado anula-se com a força que o elemento tracionado exerce sobre o elemento comprimido, pois tem o mesmo valor e sentidos contrários, ficando assim o sistema em auto-equilíbrio (Figura 2.3).

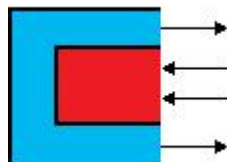


Figura 2.3 – Equilíbrio de forças.

Este varão composto por dois elementos seria feito em pré-fabricação, indo para obra já pronto. Em obra, seria aplicado como um varão tradicional mas teria de se deixar uma extremidade acessível. Aplicado num elemento de betão armado, depois do betão ganhar uma determinada resistência, através da extremidade acessível, teria de se cortar a ligação entre os dois elementos, e o elemento interior (antes comprimido) poderia ser retirado. Quando a ligação é desfeita o elemento interior expande livremente, mas o elemento exterior não pode contrair livremente porque se encontra aderente ao betão, exercendo um esforço de compressão sobre este.

2.3 MATERIAIS COMPATÍVEIS

Neste item, discutem-se algumas hipóteses de combinação de materiais com vista à concretização do referido varão pré-tensioando.

2.3.1 FLUÍDO/AÇO

Uma hipótese era o elemento exterior ser de aço (tubo) e o elemento interior (comprimido) ser um fluido (ex: óleo) que fosse injectado para o interior do elemento a traccionar. Em obra seria aplicado como qualquer outro varão. Para transferir o pré-esforço para a peça bastaria, apenas, fazer uma abertura que deixasse descomprimir o líquido. Mas está técnica tem dois contras que inviabilizam a sua aplicação. Um, é que o fluido iria criar também tensões transversais que originam a expansão radial do tubo e consequentemente a contracção quando o fluido for libertado. Ora isto pode pôr em causa a aderência do betão ao tubo devido às tensões negativas que se desenvolverão na superfície de contacto. O outro contra, é que a tensão de pré-esforço máxima atingível fica condicionada pela tensão máxima radial. O gráfico da Figura 2.4 evidencia esse fenómeno.

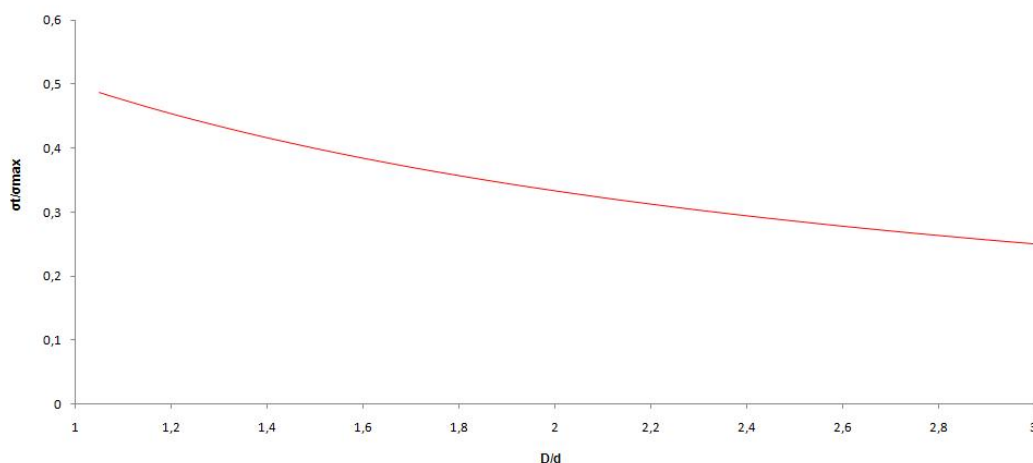


Figura 2.4 – Equilíbrio de forças.

No eixo vertical é apresentada a relação entre a tensão longitudinal atingível (σ_l) e a tensão máxima (σ_{max}) suportada pelo material. No eixo horizontal apresenta-se a relação entre os diâmetros “D” e “d” de acordo com a Figura 2.1. Por exemplo, para um tubo homogéneo, em que o diâmetro interior (diâmetro do furo) seja metade do diâmetro exterior ($D/d=2$), a tensão máxima a que se consegue pré-esforçar o varão será 1/3 da tensão resistente do material.

2.3.2 AÇO/AÇO

O aço é um material que apresenta uma boa capacidade de resistência à compressão, mas tem o problema da encurvadura. Neste caso, o elemento traccionado será um tubo e o elemento comprimido um varão que, se não existirem folgas, não tem a possibilidade de encurvar sendo admissível comprimi-lo até à plastificação.

Para garantir um pré-esforço eficaz, e que não se perca por fluência do betão, necessita-se de uma extensão na armadura de cerca de 6‰ ou superior. O aço apresenta um modo de elasticidade próximo de 200GPa, então, para conseguir-se uma extensão de 6‰, em regime elástico, necessita-se de uma tensão instalada no aço superior a 1200MPa. No mercado não se encontram disponíveis perfis de aço

em forma de tubo circular, com parede espessa e com resistência desta ordem de grandeza. Assim, embora se ache que esta era a combinação ideal, terá de ser abandonada por falta de material.

2.3.3 GFRP/AÇO

Os FRP (Fiber-Reinforced Polymer) são materiais compósitos que apresentam características interessantes para este tipo de aplicação. Possuem um módulo de elasticidade baixo, uma tensão última elevada e uma extensão de ruptura muito superior à tensão de plastificação do aço. Estes materiais não apresentam patamar de cedência, tem um comportamento linear reversível até a rotura. O facto de terem uma extensão última elevada torna-os materiais adequados para constituírem o elemento traccionado (Juvandes, 1999). Segundo Reis (2009), os varões FRP apresentam as características presentes no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Propriedades mecânicas de varões de FRP (Reis, 2009).

Propriedade	Material		
	CFRP	AFRP	GFRP
Tensão última (MPa)	600 a 3690	1000 a 2540	450 a 1600
Módulo de elasticidade (GPa)	100 a 580	40 a 125	35 a 60
Extensão de rotura (%)	0.5 a 1.7	1.9 a 4.4	1.2 a 3.7

Na opinião de Reis (2009), os varões de GFRP (Glass Fiber-Reinforced Polymer) apresentam um custo muito mais baixo que os varões compostos por outros tipos de fibras. O custo destes varões, para a mesma resistência, é próximo do custo dos varões de aço. Para esta aplicação, resistências entre 450 1600 MPa são adequadas, e, como o custo é mais baixo, decidiu-se usar este material.

O facto de o GFRP possuir um modo de elasticidade baixo torna difícil o cumprimento dos valores de serviço. Isto constitui um entrave à utilização deste material em betão armado. Com esta técnica de pré-esforço esse uso pode ser potenciado.

Para o elemento interior vamos manter o aço da opção anterior. O aço não vai interferir no valor de pré-esforço que o elemento exterior aplica à peça de betão. O aço apenas tem de garantir o equilíbrio em quanto o varão não é aplicado.

No seguimento deste documento, o elemento exterior e o interior serão designados como tubo de GFRP e varão de aço respectivamente.

Talvez para futuro desenvolvimento, se poderá estudar a hipótese de colocar o varão interior a funcionar como armadura posterior de pré-esforço, o que para isso este terá de ficar preso numa extremidade e na outra ser esticado, fixo posteriormente a peça ser betonada.

2.4 PERFIS COMERCIAIS DISPONÍVEIS

Começou por se procurar no mercado nacional empresas produtoras de perfis de GFRP pultrudidos. O único fabricante encontrado foi a ALTO, empresa com sede na Zona industrial da Maia, que tem disponíveis tubos com diâmetro exterior (D) de 16 mm e diâmetro interior (d) de 10 mm. Um tubo com esta secção era perfeitamente adequado para os testes que se pretendem realizar. No entanto, a empresa, de momento, só possuía em stock tubos com um comprimento de 80 centímetros. A dimensão pretendida é da ordem dos 2 metros, o que obrigaria a aguardar por uma nova produção.

Face as dificuldades em obter produtos nacionais, decidiu-se pesquisar o mercado internacional de modo a obter outros fornecedores. Foram encontradas duas empresas europeias que produzem tubos de GFRP com dimensões adequadas para este trabalho. A primeira contactada foi a Prince Fibre Tech, empresa Holandesa, dedicada à fabricação de tubos e varões pultrudidos reforçados com vários tipos de fibras. A gama de perfis tubulares disponíveis encontra-se em anexo. Dessa gama achou-se que o tubo mais adequado seria de diâmetros $D=12\text{mm}/d=7,8\text{mm}$ (exterior/interior), com um módulo de elasticidade de 56 GPa e uma tensão de ruptura de 1450 MPa.

Mas devido à demora na resposta ao nosso pedido, decidiu-se contactar a Fibrolux (um fabricante alemão) dedicado à produção de perfis pultrudidos de GFRP em geral. Entre os tubos disponíveis para entrega imediata, escolhe-se o tubo com dimensões $D=14\text{mm}/d=11\text{mm}$ (diâmetros exterior/interior) que foi entregue em prazo útil para o desenvolvimento deste trabalho. Os estudos feitos nos capítulos que se seguem apenas tratarão o tubo deste fabricante.

2.5 MECANISMO DE PRÉ-TENSIONAMENTO

No caso de uma produção em série, o tubo de GFRP poderia ser pré-tensionado com macacos hidráulicos. Os macacos esticariam o tubo até a um determinado valor e, de seguida, seriam solidarizadas as extremidades do tubo e do varão de aço. Esta técnica teria de ser estudada e detalhada caso se avançasse para a produção.

No presente trabalho, decidiu-se efectuar o pré-tensionamento do varão misto, através do aperto de parafusos. A Figura 2.5 esquematiza o sistema que irá ser utilizado neste trabalho.



Figura 2.5 – Mecanismo de pré-tensionamento.

Uma extremidade do tubo de GFRP terá de ser tapada para servir de batente ao varão de aço. Na outra extremidade será fixada uma chapa que fará a transferência da força do tubo de GFRP para os parafusos. Por sua vez, os parafusos irão exercer essa força sobre uma outra chapa que está em contacto com o varão de aço. Ao apertar os parafusos, vamos obrigar o tubo de GFRP a estender e o varão de aço a encurtar através da compatibilidade de deformações entre os 2 materiais. A extensão a dar ao tubo será controlada pela variação do afastamento das duas chapas.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo retém a promessa da concretização de uma ideia para a concepção de um sistema novo de varão pré-tensionado, constituído por 2 componentes que se encontram em auto-equilíbrio (um traccionado e o outro comprimido). Este sistema tem a vantagem de poder ser executado em pré-fabricação. Para efeitos de experimentação em laboratório, este sistema admite a concepção de um mecanismo de implementação de pré-tensão por aperto de parafusos que impõem a compatibilidade de deformações entre a parte traccionada e a parte comprimida. Face a uma análise das várias hipóteses de selecção dos materiais, a combinação FRP vs aço constatou-se ser a mais adequada para a materialização do varão misto.

3

CARACTERIZAÇÃO DOS TUBOS DE GFRP

3.1 INTRODUÇÃO

O objectivo deste capítulo é o de seleccionar o tubo de GFRP a utilizar na progressão dos objectivos gerais desta tese, isto é, a definição de uma nova técnica e de um novo cabo de pré-esforço para estruturas simples de betão armado.

Para o efeito, foi necessário estudar alguns modelos que tornassem viável a caracterização mecânica à tracção do tubo de GFRP e solucionassem o mecanismo de ancoragem das extremidades do futuro cabo de pré-esforço. Estas preocupações são analisadas neste capítulo em termos de 2 modelos, dos materiais constituintes e do tipo de sistema de ancoragem das extremidades do futuro cabo.

Em conclusão, estabelece-se o modelo base eleito através da definição das características geométricas e mecânicas a ter como referência ao longo deste trabalho. Em paralelo, tecem-se algumas considerações relativas à comparação das propriedades obtidas experimentalmente em laboratório e as especificações técnicas do sistema de GFRP comercial disponibilizado para a investigação em curso.

3.2 DEFINIÇÃO DO MODELO DE TRACÇÃO

Para efeitos de caracterização dos tubos de GFRP (polímero reforçado com fibras de vidro uniaxiais), com vista à identificação das propriedades necessárias para o presente trabalho e avaliação do seu comportamento em termos de resposta à solicitação em tracção uniaxial, decidiu-se definir 2 modelos para análise, pelas razões que se expõem de seguida.

A limitação dos potenciais produtos de GFRP disponíveis no mercado nacional, obrigou à consulta de empresas internacionais especializadas nesta área, como se descreveu no capítulo 2. Face à informação dessa sondagem de mercado e da resposta dos fornecedores para disponibilizarem o material em tempo útil para o estudo, optou-se restringir o trabalho à caracterização dos tubos de GFRP de referência Fibrolux GMBH (FIBEX, 2010), cujas principais propriedades estão descritas na ficha técnica disponibilizada em anexo.

Por não existir uma norma adequada com especificações técnicas (informações geométricas, mecânicas e de comportamento a curto e longo prazo) sobre os tubos de FRP em geral, resolveu-se usar, visando os objectivos deste trabalho, a informação técnica disponível nos documentos do ACI 440.3R-04 (2004) e ACI 440.1R-06 (2006) relativos ao uso de varões de FRP em estruturas de betão armado. Para o efeito foram consultadas as seguintes normas com especificações para a caracterização mecânica de perfis pultrudidos de FRP: EN 13706-2 (2002); ISO 527-5 (1997); ASTM D 3916 (2002) e ASTM D 638 (2003). Dessas normas, o estudo incide sobretudo na caracterização do material à tracção, cuja informação é fundamental para o desenvolvimento do presente trabalho.

Como o varão em análise é um tubo em GFRP e o equipamento disponível no laboratório LABEST não se ajustar directamente ao mesmo, houve necessidade de estudar um modelo para ensaio de tracção uniaxial que permitisse caracterizar o material à tracção. Nessas circunstâncias, passou a ser importante estabelecer um sistema de amarração adequado aos provetes de tracção, mas que também no futuro, apresentasse um comportamento adequado de amarração a adoptar no sistema de ancoragem a descrever no próximo capítulo sobre o novo cabo de pré-esforço.

As amarrações foram materializadas pela fixação de parafusos furados em ambas as extremidades do tubo, sendo esta fixação feita através de cola ou cola e rosca. Pretende-se garantir uma ligação com capacidade resistente superior à do próprio tubo. Para isso foram testadas várias colas e sistemas de amarração. A análise dos sistemas de amarração e a avaliação das características mecânicas dos provetes de GFRP à tracção foram realizadas em simultâneo, na sequência dos vários ensaios de tracção axial realizados neste trabalho.

Em seguida, descrevem-se os 2 modelos estudados, apresentando o mesmo provete de GFRP da Fibrolux, mas diferentes sistemas de amarração.

3.2.1 MODELO A

A ideia inicial para a execução deste modelo passava pela utilização somente de roscas para a fixação do tubo de GFRP (1) às cabeças de amarração (parafusos M27) (3), existindo uma zona de transição, para uma melhor compatibilização das extensões, formada por um segundo tubo de GFRP (2) com um diâmetro interior ligeiramente inferior ao exterior do primeiro e com um diâmetro exterior ligeiramente superior ao diâmetro do furo do parafuso, para possibilitar a execução das roscas. Este segundo tubo prolonga-se cerca de 2 centímetros para além da extremidade do parafuso. No entanto devido à dificuldade da execução de roscas no GFRP, optou-se por suprimir a rosca entre os dois tubos de GFRP, sendo esta materializada apenas por uma colagem. Devido a imperfeições, também se decidiu aplicar cola na rosca entre o segundo tubo de GFRP e o parafuso.

Nas Figuras 3.1 e 3.2 ilustra-se o esquema e o critério de montagem do modelo A.

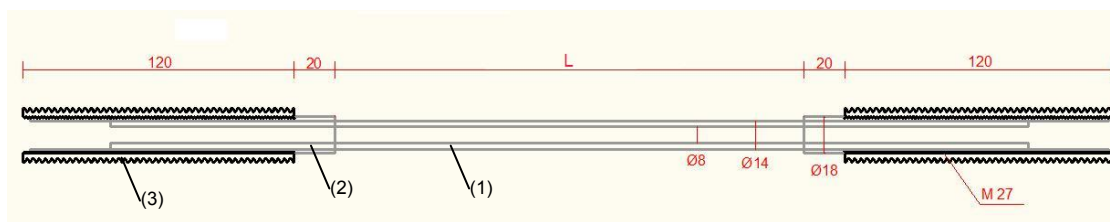


Figura 3.1 – Esquema do modelo A (dimensões em mm)

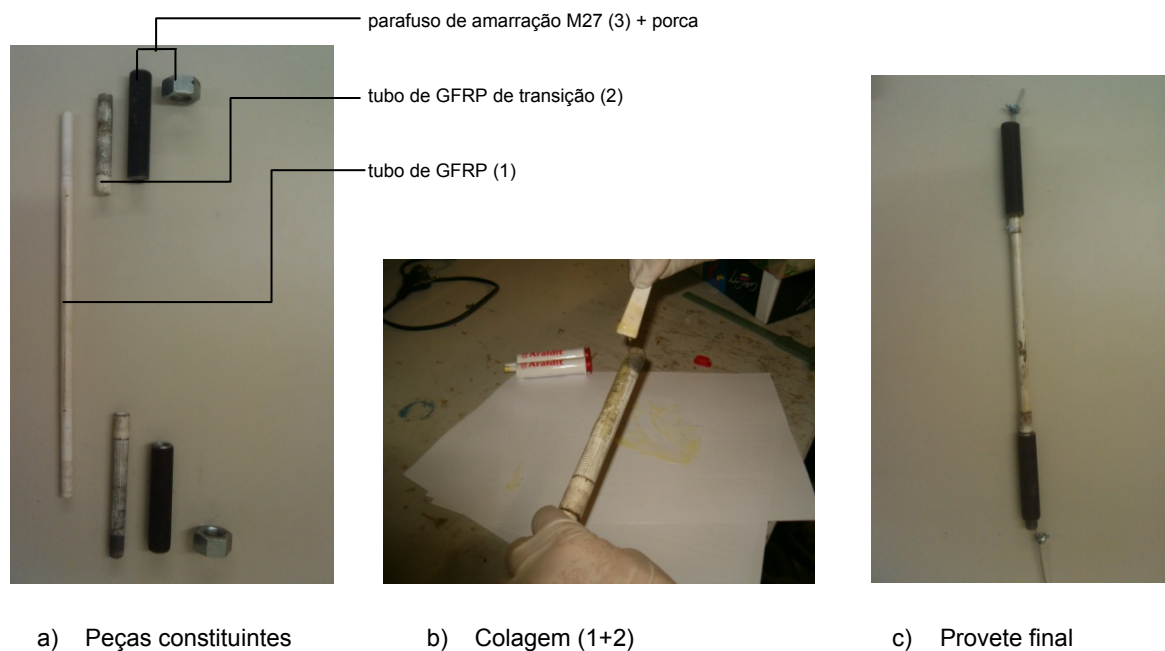


Figura 3.2 – Montagem do modelo A.

3.2.2 MODELO B

Trata-se de um modelo com um sistema de amarração bastante mais simples do que o modelo A. É formado por 3 peças: dois parafusos M24, um deles furado por completo (2) e outro com a cabeça por furar (3), onde introduzido o tubo de GFRP (1), com as extremidades impregnadas com cola.

Nas Figuras 3.3 e 3.4 ilustram-se o esquema e o critério de montagem do modelo B.

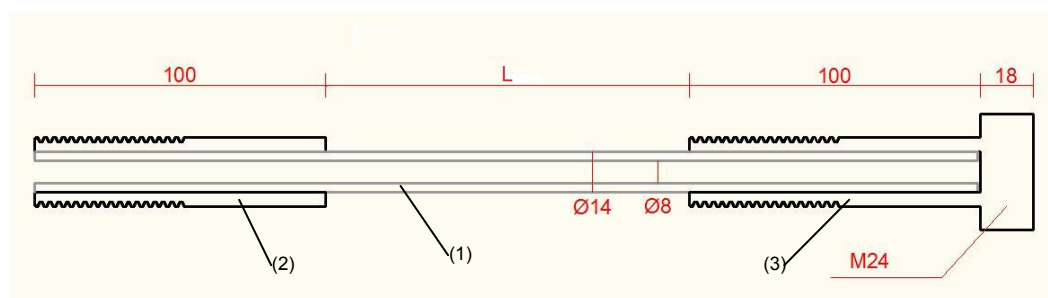


Figura 3.3 – Esquema do modelo B (dimensões em mm)

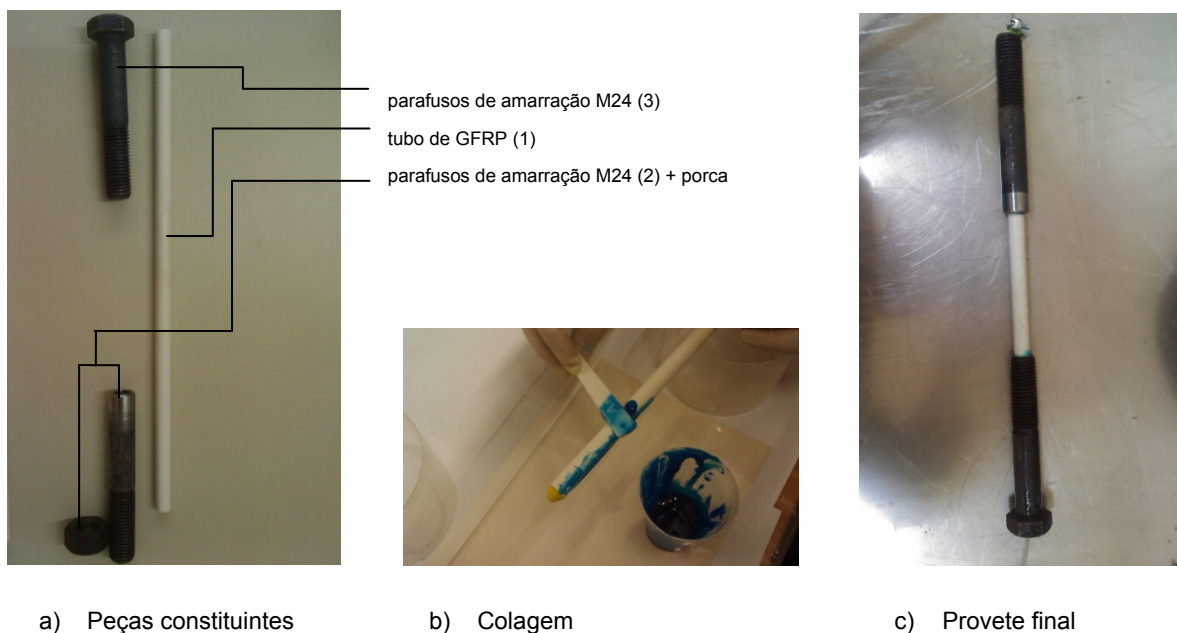


Figura 3.4 – Montagem do modelo B.

3.3 PROVETES E MATERIAIS

De acordo com os modelos anteriores, para efeito de caracterização dos tubos de GFRP foram construídos seis provetes, com características apresentadas no Quadro 3.1, utilizando as colas ilustradas na Figura 3.3.

Quadro 3.1 – Definição dos provetes para ensaios de tracção.

Modelo	Proвете	Cola utilizada	Tubo $\phi_{ext} - \phi_{int}$ (mm)	Área (mm ²)	Comprimento L (cm) ⁽¹⁾
A	1	Araldite Rápido	14 - 8	103,67	270
	2	Araldite Rápido			270
B	3	Bettor Resin 55			124
	4	Bettor Resin 55/Sikadur 330 ⁽²⁾			123
	5	Araldite 420			127
	6	Araldite 420			129

(1) Comprimento livre do tubo de GFRP

(2) Foi utilizada uma cola em cada extremidade



a) Araldite Rápido

b) Bettor Resin 55
(ficha em anexo)c) Sikadur 330
(ficha em anexo)d) Araldite 420
(ficha em anexo)

Figura 3.5 – Colas usadas no trabalho.

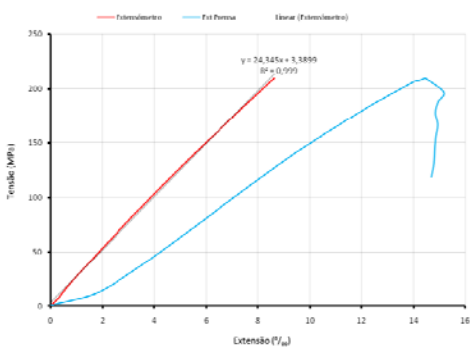
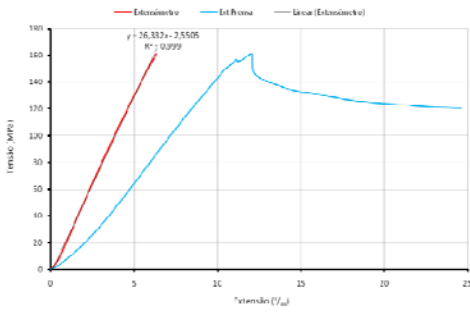
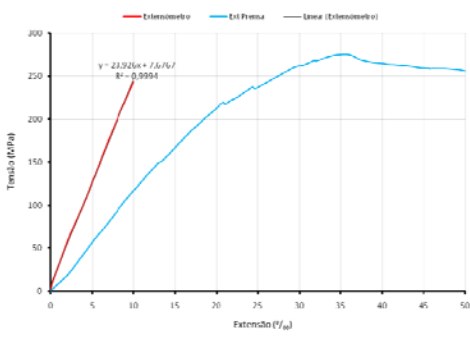
3.4 ENSAIOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

Depois de decorrido o tempo necessário para a cura da cola, os provetes foram ensaiados no LABEST, de acordo com a norma ASTM D 3916 (2002), como se ilustra na Figura 3.6. Neste ensaio, foi imposta uma velocidade de 1mm/min (0,016mm/s) e medida a força da prensa e a extensão no tubo em intervalos de 0,1 segundos. A partir destes dados, foram construídos os gráficos apresentados no Quadro 3.2. Para obter a tensão, foi dividida a força pela área do tubo que, relacionada com a deformação medida no extensómetro, originou os diagramas de tensão vs extensão, que se ilustram no quadro e cuja curva é apresentada a vermelho. A curva a azul relaciona a tensão com a extensão, calculada a partir do deslocamento da prensa, tendo em conta o comprimento “L” do tubo de GFRP. Devido à deformação das amarras e a um possível escorregamento das colagens as duas curvas não coincidem, sendo a curva a vermelho a que traduz correctamente a relação tensão vs extensão do tubo. No entanto esta curva está limitada a uma extensão de 10‰, momento em que é retirado o extensómetro para prevenir uma possível dano face à iminência da ruptura. A curva a azul é importante porque evidencia fenómenos eventuais de descolagem e fornece os valores reais da tensão a que o tubo está sujeito até ao colapso.

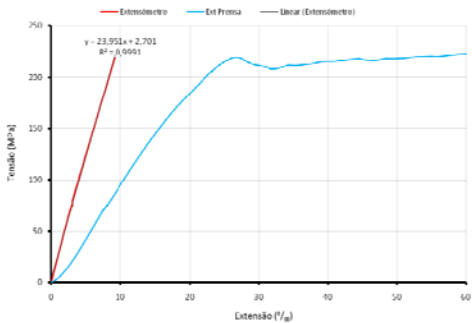
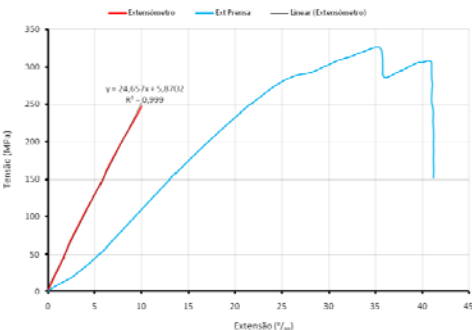
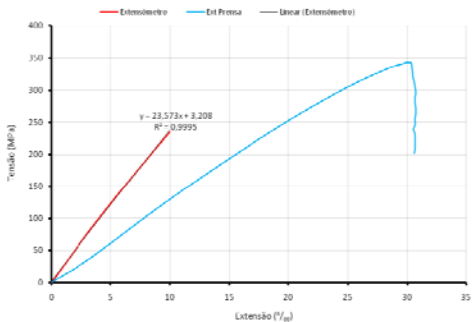


Figura 3.6 – Vista geral do ensaio de tracção uniaxial dos modelos de GFRP.

Quadro 3.2 – Resultados e observações dos ensaios de tracção nos modelos A e B.

Modelo	Diagrama Tensão vs Extensão	Modos de ruína	Observações
Modelo A			Descolagem da ligação do tubo principal ao tubo auxiliar. Apresenta uma queda brusca da capacidade resistente, tendendo estas para zero
	Figura 3.7 – Comportamento do provete 1		
			Descolagem da ligação do tubo principal ao tubo auxiliar. Apresentando ainda alguma resistência devido ao atrito entre as zonas coladas.
Modelo B	Figura 3.8 – Ruptura dos provetes 1 e 2		
	Figura 3.9 – Comportamento do provete 2		
			Descolagem da ligação do tubo ao parafuso, mantendo-se a resistência da ligação, devido ao atrito entre as zonas coladas. À medida que decresce a área de contacto esta resistência vai diminuindo.
	Figura 3.10 – Comportamento do provete 3		
		Figura 3.11 – Ruptura do provete 3	

Quadro 3.2. – Gráficos, imagens da ruptura e observações (continuação)

Modelo	Diagrama Tensão vs Extensão	Modos de ruína	Observações
Modelo B			Descolagem da ligação do tubo ao parafuso, sem quebra da resistência da ligação, devido ao atrito entre as zonas coladas. À medida que decresce a área de contacto, esta resistência tenderá a diminuir.
			Ruptura brusca do tubo de GFRP sendo composta por descolagem interlaminar e por quebra de algumas fibras.
			Semelhante ao anterior

Os gráficos apresentados no quadro 3.2. fornecem a tensão última resistente, de cada provete (valor máximo da curva de cor azul). Fazendo uma interpolação linear, da curva a vermelho, foi possível obter o seu declive médio, sendo este igual ao modo de elasticidade.

Quadro 3.3 – Resumo dos principais resultados dos ensaios de tracção

Modelo	Provete	Tipo de ruptura	Força máxima (kN)	Tensão última (MPa) ⁽ⁱ⁾	Extensão correspondente a força máxima (‰) ⁽ⁱⁱ⁾	Tensão correspondesse à extensão de 10‰ (MPa) ⁽ⁱⁱⁱ⁾	Modo de elasticidade (GPa)
A	1	Cola	16,75	161,54	6,4	-	26,33
	2	Cola	21,75	208,81	8,6	-	24,34
B	3	Cola	28,53	275,17	s/valor	243,87	23,93
	4	Cola	24,71	238,30	9,2	-	23,95
	5	Tubo	33,86	326,58	s/valor	246,88	24,65
	6	Tubo	35,52	342,59	s/valor	235,75	23,57

⁽ⁱ⁾ – Tensão última = Força máxima / Área; ⁽ⁱⁱ⁾ – Extensão medida através do extensómetro exterior no momento da ruptura (curva a vermelho); ⁽ⁱⁱⁱ⁾ – Tensão no tubo na altura em que foi retirado o extensómetro exterior.

3.5 PROPRIEDADES FÍSICAS A RETER NO TRABALHO

Efectuando uma média dos valores do modo de elasticidade calculado para os diferentes provetes, chegámos ao modo de elasticidade médio. Do mesmo modo, calculou-se o valor médio da tensão última, mas neste caso só foram usados os valores dos dois últimos provetes, já que foram os únicos em que o tubo rompeu. A partir destes dois valores, dividindo a tensão última pelo modo de elasticidade, obtemos a extensão última que o tubo atingiu antes da ruptura, na medida em que este valor não poderia ser retirado da curva a azul pelos motivos indicados atrás.

Quadro 3.4 – Propriedades mecânicas do GFRP estimadas.

Propriedade	Valor
Módulo de elasticidade médio (E_{fm})	24,46 GPa
Desvio padrão σ_{Efm}	0,987976
Tensão última média ($f_{fu,m}$)	334,58 MPa
Extensão última média ($\epsilon_{fu,m}$)	13,67 ‰

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tubo FIBROLUX encomendado para o trabalho foi o de referência 14-8 (diâmetro exterior vs diâmetro interior) de fibra de vidro (referência “GRP perfil PRFV UD”). Comparando as propriedades obtidas a partir do ensaio de tracção uniaxial realizado no LABEST (Quadro 3.4) com as indicadas pelo fabricante na sua ficha técnica (ficha em anexo FIBROLUX GmbH (2010)) e resumidas no Quadro 3.5 relativas às fibras de vidro GFRP, é imediato constatar que não se pode tratar do mesmo material. No entanto as propriedades determinadas experimentalmente aproximam-se das do tubo FIBROLUX de referência “GRP perfil PRFV MR”, pelo que é de achar que foi este o material fornecido e não o que foi pedido.

Quadro 3.5 – Propriedades médias fornecidas pela Fibrolux

Propriedades mecânicas	Tipo Perfil PRFV MR ⁽ⁱ⁾		Tipo Perfil PRFV UD ⁽ⁱⁱ⁾
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal
Resistência á tracção	250 MPa	30-80 MPa	1000 MPa
Resistência á flexão	250 MPa	30-80 MPa	1000 MPa
Módulo de elasticidade E (tracção)	23000 MPa	8000 MPa	40000 MPa
Módulo de elasticidade E (flexão)	25000 MPa	9000 Mpa	45000 MPa
Alongamento após ruptura	1,0 - 1,8%		2%
Resistência à compressão	450 MPa	90 MPa	450 MPa
Módulo de elasticidade E (compressão)	1000 MPa	4000 MPa	30000 MPa

⁽ⁱ⁾ – Material enviado; ⁽ⁱⁱ⁾ – Material pedido.

Com uma tensão última de cerca de 1/3 da esperada, é de hesitar se se deverá prosseguir com o trabalho ou se deverá procurar outros tubos. Por razões de cumprimento de prazos, a única hipótese para avançar com o trabalho foi prosseguir com este material. É de compreender que, com características tão diferentes das esperadas, o resultado final seja bastante afectado. Ainda assim, acha-se possível que os objectivos deste trabalho sejam alcançados.

4

ESTUDO DE UM CABO DE PRÉ-ESFORÇO

4.1 INTRODUÇÃO

O objectivo deste capítulo é o de se conhecer o comportamento do novo cabo de GFRP, quando é submetido ao pré-esforço e o de se perceber quais são as variações de esforços e de extensões depois de aplicado como armadura num elemento de betão armado.

Primeiro, estabelece-se a definição do modelo de cabo de pré-esforço, estuda-se um critério para o estabelecimento do valor do pré-esforço a implantar e, por fim, as fases de preparação e aplicação da técnica de pré-tensão do modelo.

Posteriormente, decidiu-se fazer um teste que consiste em pré-esforçar o tubo de GFRP definido no capítulo 3 e finalmente fixá-lo pelas suas extremidades a uma base praticamente indeformável. Este teste só faz sentido se tivermos conhecimento dos valores das forças e das extensões a que o cabo fica sujeito. Para isso, foi criado um sistema de monitorização constituído por extensómetros, transdutores de deslocamentos LVDT's e uma célula de carga. Este sistema fornece os valores das forças e extensões, não só na altura de aplicação, mas também durante um período significativo para que seja possível identificar fenómenos de relaxação.

A título de consideração final para o futuro desenvolvimento da presente investigação, é estabelecido o valor do pré-esforço a implementar no cabo de GFRP e o critério de aplicação do sistema de pré-tensão, de modo a obter-se esse mesmo valor (técnica de pré-tensão do tubo de GFRP) no futuro elemento de betão armado a pré-esforçar.

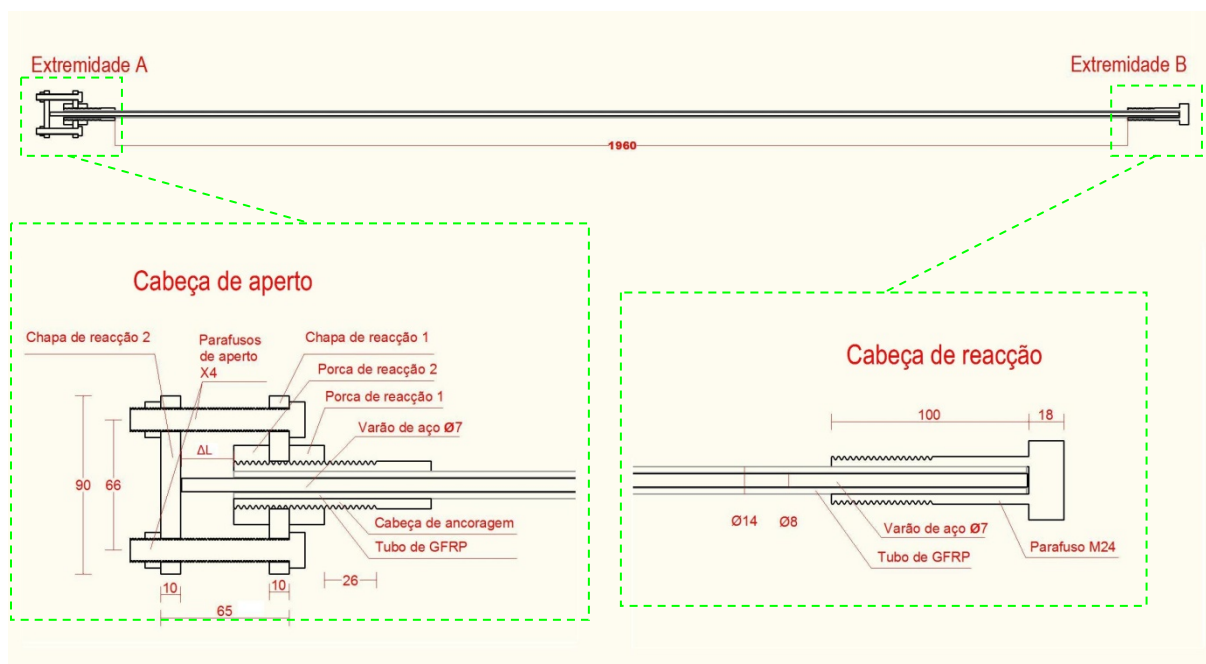
4.2 DEFINIÇÃO DO MODELO

O modelo é constituído por um tubo de GFRP (seleccionado no capítulo 3) com o comprimento máximo de 2200mm, condicionado pelo transporte/fornecedor, de modo a conseguir-se um ajuste adequado do valor do pré-esforço à situação real e a reduzir-se eventuais erros do comportamento do cabo e serviço. Esse comprimento do cabo irá ser usado, também, no ensaio do comportamento da viga de betão armado com pré-esforço, incluída no capítulo 5.

Para proporcionar a pré-tensão no tubo de GFRP, recorreu-se ao uso de um varão de aço de pré-esforço com dimensão e propriedades adequadas à implementação desta nova técnica. A empresa

Socitrel disponibilizou alguns varões de aço (fio de aço para pré-esforço) com diâmetro $\phi 7$ mm, liso, com as características mecânicas, indicadas na ficha técnica incluída em anexo.

O sistema de ancoragem é constituído pelas cabeças de amarração (aperto e de reacção), definidas no modelo B do capítulo anterior, desenvolvidas para este tipo de aplicação. A aplicação da pré-tensão ao tubo de GFRP implica a introdução de um mecanismo de aperto descrito no capítulo 2, item 2.5. Esse mecanismo para aperto é constituído por duas chapas de aço. Uma exerce reacção sobre a cabeça de amarração e a outra transmite essa força ao varão de aço (inserido no interior do tubo de GFRP) que, por sua vez, este descarrega a força na cabeça de reacção da outra extremidade. A aproximação destas duas chapas, por aperto de quatro parafusos, irá accionar o mecanismo de pré-tensão do sistema GFRP-Aço. Estas peças estão definidas na Figura 4.1.



Cabeça de aperto



Cabeça de reacção

Figura 4.1 – Esquema e ilustrações do cabo de pré-esforço e do mecanismo de aperto (medidas em mm)

4.3 CÁLCULO DO VALOR DE PRÉ-ESFORÇO

Considerando a tensão última e a extensão última determinadas no capítulo anterior e atendendo às propostas internacionais do ACI (ACI 440.1R-06, 2006) e da Fib (Fib, 2007), que sugerem limitar a tensão máxima de serviço a 60% da tensão última, decidiu-se pré-esforçar o cabo para 70% da tensão última. Este valor resulta de se prever que, quando o esforço for transferido para a peça de betão armado, a tensão desça para os 60% da tensão última (admitiu-se uma perda de 10%). No Quadro 4.1. expõem-se os valores das grandezas calculadas para as diferentes percentagens de aplicação do pré-esforço em relação a aos valores de ruptura (hipóteses 1, 2 e 3).

Quadro 4.1 – Valores das grandezas a que o varão fica sujeito para diferentes percentagens de aplicação em relação à ruptura.

Grandezas	Ruína		Serviço
	Hip 1	Hip 2 (60%x Hip 1)	Hip 3 (70%x Hip 1)
Tensão ($\sigma_{\max}$) (MPa)	334,6	200,8	234,2
Força (F_{GFRP}) (kN)	34,7	20,8	24,3
Extensão ($\epsilon_{000}^{(i)}$)	13,67	8,20	9,57
Δl_{GFRP} (mm) ⁽ⁱⁱ⁾	26,79	16,07	18,76

⁽ⁱ⁾ – $\epsilon_{\max} = \sigma_{\max}/E$, com $E = 24,46$ GPa; ⁽ⁱⁱ⁾ – $\Delta l_{GFRP} = L \times \epsilon$, com $L = 1960$ mm.

O valor do pré-esforço a aplicar é controlado pela diferença de comprimento Δl saliente do varão de aço (ver Figura 4.1). Depois do aperto, que por compatibilidade de deformações, impõe um aumento de comprimento do GFRP e uma diminuição do comprimento do aço, a distância Δl será nula. Assim vem que, pelas equações de equilíbrio e compatibilidade de deformações:

$$F_{Aço} = F_{GFRP} \quad (4.1)$$

$$\Delta l = \Delta l_{aço} + \Delta l_{GFRP} \quad (4.2)$$

$\Delta l_{GFRP} \rightarrow$ Valor do Quadro 4.1 para 70% = 18,76 mm.

$$\Delta l_{aço} = \frac{\sigma_{Aço}}{E_{aço}} \times L_{aço} \quad (4.3)$$

$$A_{aço} = 38,48 \times 10^{-6} m^2 \quad (\phi 7 \text{ mm})$$

$$L_{aço} = 2220 \text{ mm}$$

$$E_{aço} = 205\,000\,000 \text{ KPa}$$

Calculando-se a tensão no aço pela seguinte fórmula:

$$\sigma_{Aço} = \frac{F_{Aço}}{A_{aço}} \times L_{aço} \quad (4.4)$$

Usando a equação 4.1 com o valor do Quadro 4.1 para 70% = 24.3 kN

Então vem:

$$\sigma_{Aço} = 630903 \text{ KPa}$$

Resolvendo a equação 4.3, obtém-se o valor do aperto necessário a impor ao deslocamento relativo das duas chapas do mecanismo de aperto ilustrado na Figura 4.1 (equação 4.2):

$$\Delta l_{aço} = 6,83 \text{ mm}$$

$$\Delta l = 6,83 + 18,76 = 25,59 \text{ mm (25,6 mm)}$$

4.4 FASES DE PREPARAÇÃO E APLICAÇÃO DE UM CABO

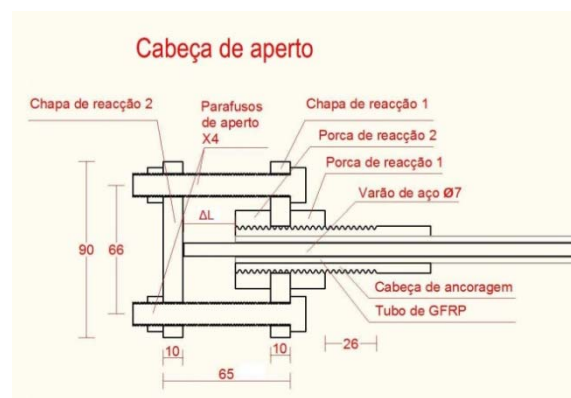
Na preparação de um cabo de pré-esforço temos as seguintes fases (ver Figura 4.2):

i. Fase de preparação

1. Colagem das cabeças de amarração / reacção;
2. Introduzir o varão de aço no interior do tubo de GFRP;
3. Colocação da porca de reacção 1;
4. Colocação da chapa de reacção 1;
5. Colocação da porca de reacção 2;
6. Colocação da chapa de reacção 2, utilizando os 4 parafusos de aperto;
7. Aperto controlado dos 4 parafusos de aperto.

ii. Fase de aplicação

1. Ajuste da porca de reacção;
2. Afrouxar os parafusos de aperto;
3. Desapertar a porca de reacção 1, retirar cabeça de aperto e remoção do varão de aço.



Sem o aperto



Com o aperto

Figura 4.2 – Esquema e ilustrações do cabo de pré-esforço e do mecanismo de aperto (medidas em mm)

4.5 MONITORIZAÇÃO DE UM CABO EM LABORATÓRIO

4.5.1 INTRODUÇÃO

Depois de seleccionado o tubo de GFRP, estabelecido o sistema que constitui o cabo a pré-esforçar e definidos os procedimentos para a implementação da técnica de pré-tensão, é importante, nesta fase, avaliar a exequibilidade da técnica e a variação de esforços e de deformações do sistema sob tensão constante, durante um período de tempo (comportamento a longo prazo). Nesse sentido, resolveu-se construir um exemplo de um cabo de GFRP pré-esforçado, fixá-lo a um sistema rígido, instalar um sistema de monitorização e deixá-lo sob tensão durante o maior período de tempo possível, condicionado pela duração de execução da presente dissertação. Espera-se neste teste ganhar alguma experiência e obter alguns valores para o capítulo 5, em que a monitorização não vai estar presente na altura da pré-tensão do sistema de GFRP-aço.

Para se realizar este modelo de teste, criou-se no laboratório LABEST um sistema de apoio para o cabo de GFRP constituído por um pórtico indeformável sobre o qual, na viga superior, se fixaram 2 esquadros rígidos (cantoneiras) para apoio e fixação das cabeças de aperto e de reacção do cabo. Uma visão geral do sistema de apoio está ilustrada na Figura 4.3.



Figura 4.3 – Sistema de apoio

4.5.2 INSTRUMENTAÇÃO

Para conseguir controlar os valores de todas as grandezas relevantes neste estudo, decidiu-se criar uma monitorização composta por:

- Três extensómetros eléctricos com resistência de 120Ω , comprimento de 6mm e com referência EA-06-125BT-120 (VMM);
- Dois transdutores de deslocamentos LVDT's com curso de ± 5 mm;
- Uma célula de carga com capacidade de 50 kN.

A Figura 4.4 exhibe o local onde estes sensores foram colocados.

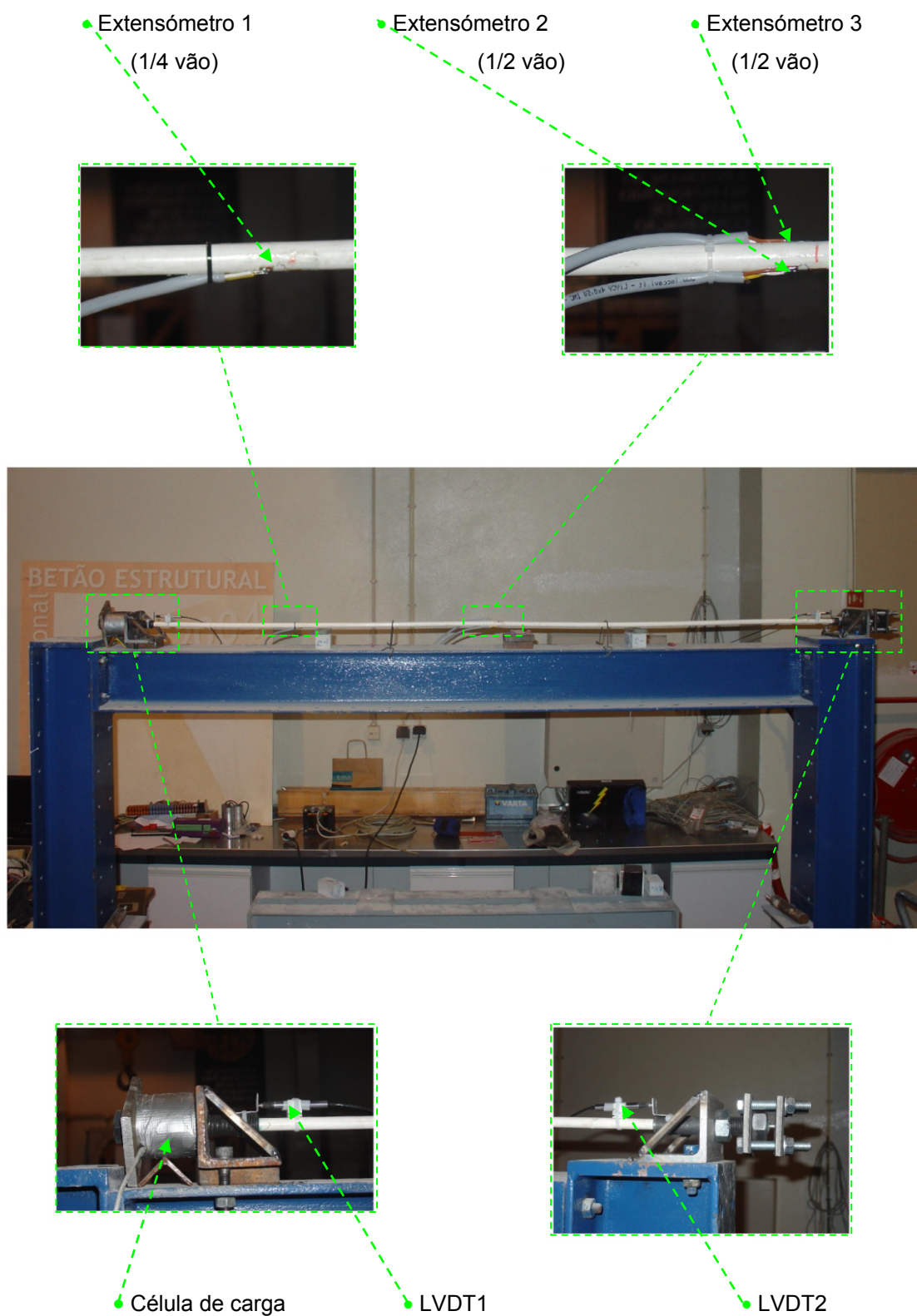


Figura 4.4 – Posicionamento dos sensores de monitorização do varão

Os extensómetros têm a função de mediar a extensão em diferentes pontos do tubo e também possibilitam, caso ocorra, a identificação de escorregamento interlaminar (aplicaram-se 3 unidades, 2 na secção central e 1 na secção a $\frac{1}{4}$ do vão). A função dos LVDT's é determinar o deslocamento relativo entre o tubo e as cabeças de amarração (aperto e reacção). Por isso, eles são colocados nas extremidade do GFRP, possibilitando detectar se ocorre algum fenómeno de descolagem das cabeças metálicas relativamente ao tubo de GFRP. A célula de carga, colocada entre o esquadro de fixação e a cabeça de reacção, vai medir a força que o cabo descarrega nos apoios ao pórtico, quando o pré-esforço é aplicado.

Todos estes sensores transmitem a sua leitura ao datalogger. Os extensómetros e a célula de carga ligam directamente a esse, enquanto que os LVDT's necessitam de uma caixa de condicionamento de sinal prévio. Para ver ou recolher os dados do datalogger, é necessário ligá-lo a um computador. Na Figura 4.5 ilustra-se um panorama geral do sistema de aquisição dos sinais dos sensores.

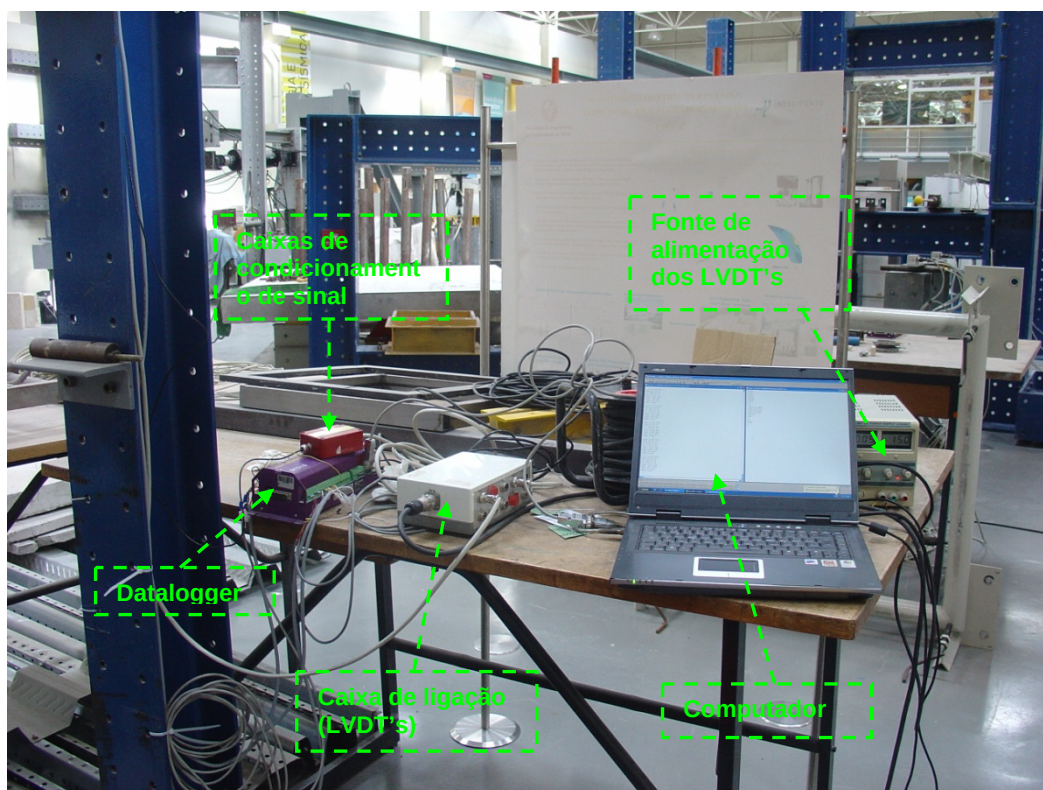


Figura 4.5 – Aspecto geral do sistema de aquisição dos sinais dos sensores.

4.5.3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O sistema de monitorização foi iniciado antes da fase 7 do item 4.4 e encontra-se em aquisição contínua de resultados. Contudo, para o presente trabalho, apenas se apresentam os resultados correspondentes aos primeiros 37 dias observados. Os dados recolhidos durante este período estão ilustrados nos gráficos de Extensão vs Tempo (Figura 4.6), de Deslocamentos vs Tempo (Figura 4.7) e de Força vs Tempo (Figura 4.8). Refira-se que este teste, sobre o cabo de GFRP, inclui duas fases: a) fase de preparação e aplicação do pré-esforço ao sistema GFRP-aço; b) fase de acompanhamento no tempo do tubo pré-tensionado e fixo ao sistema de apoio do pórtico rígido. Desse modo, os comentários aos resultados obtidos neste teste vão ser descritos de seguida, repartidos para cada uma das duas fases identificadas.

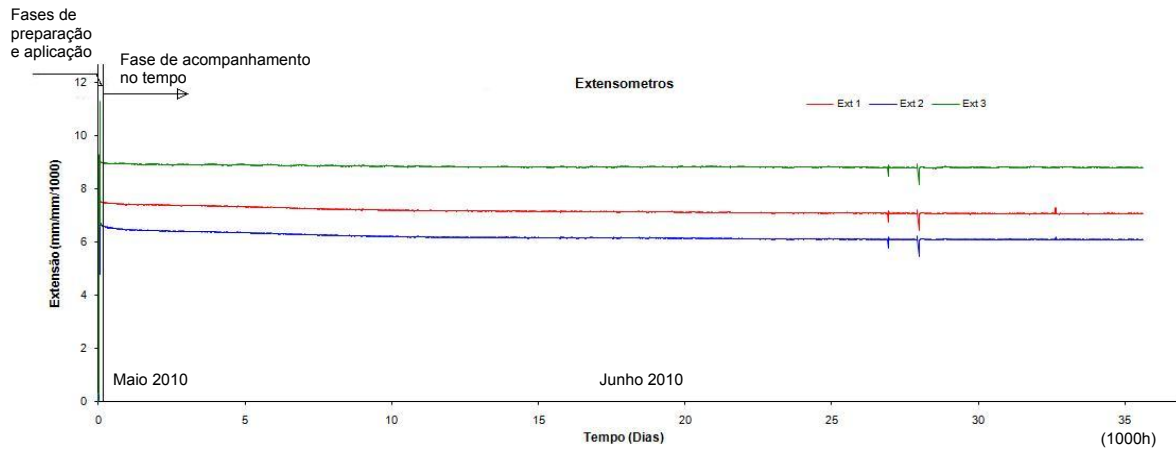


Figura 4.6 – Diagrama de Extensão vs Tempo relativo a 3 extensómetros (37 dias).

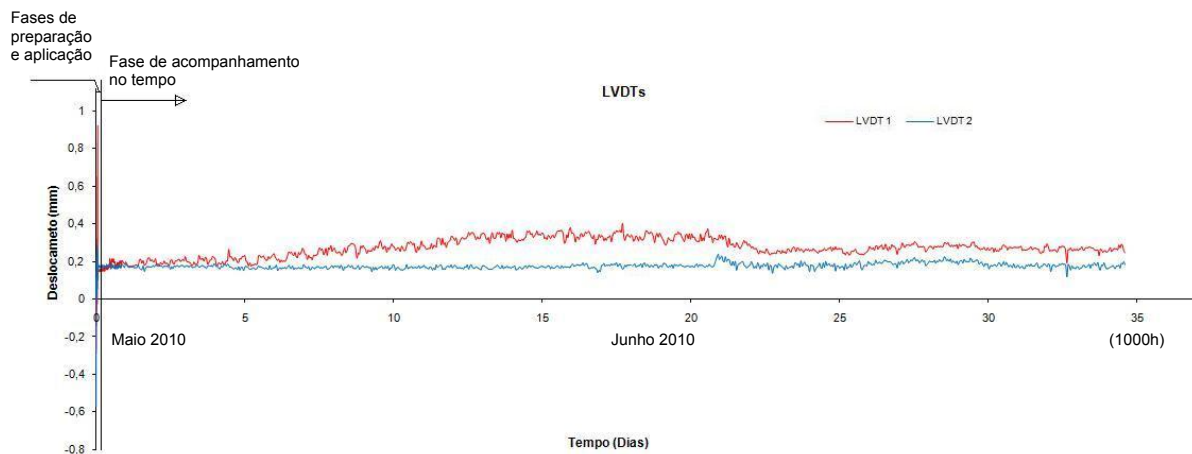


Figura 4.7 – Diagrama de Deslocamentos vs Tempo medidos pelos LVDT's (37 dias).

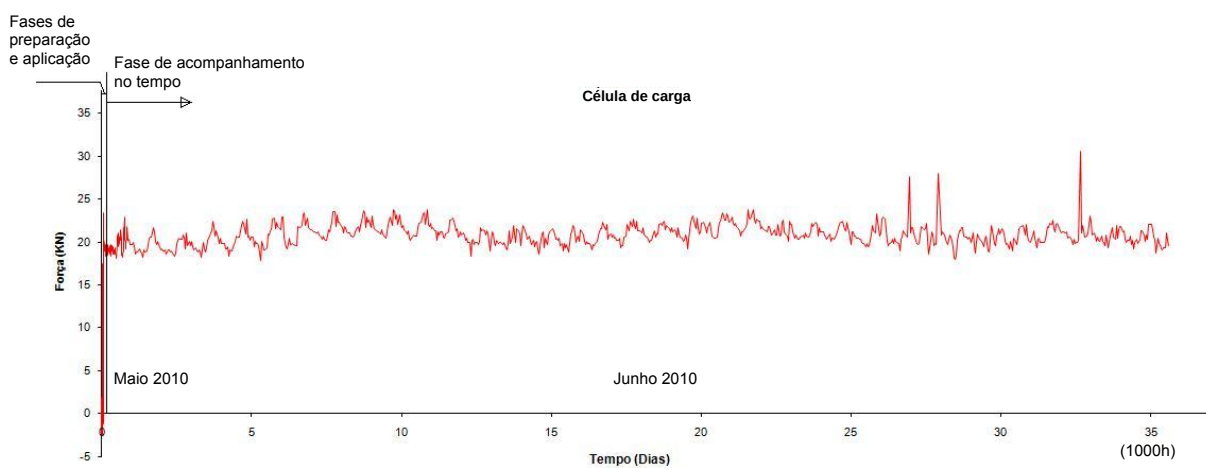


Figura 4.8 – Diagrama de Força vs Tempo instalada na célula de carga (37 dias).

a) Fases de preparação e aplicação do pré-esforço

Nos gráficos anteriores são imperceptíveis as variações das grandezas extensão, deslocamento e força ocorridas nos sensores, nas fases de preparação e aplicação do pré-esforço. Para perceber o que se passa nessas fases, foram traçados os gráficos respectivos dessas grandezas e ilustrados nas Figuras 4.9 a 4.11 em que apenas se representam as primeiras três horas.

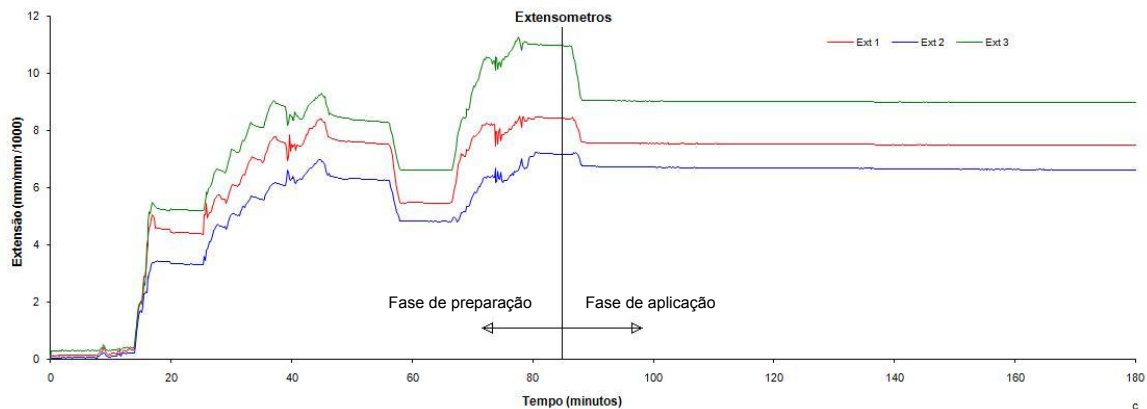


Figura 4.9 – Diagrama de Extensão vs Tempo relativo a 3 extensómetros (3 horas).

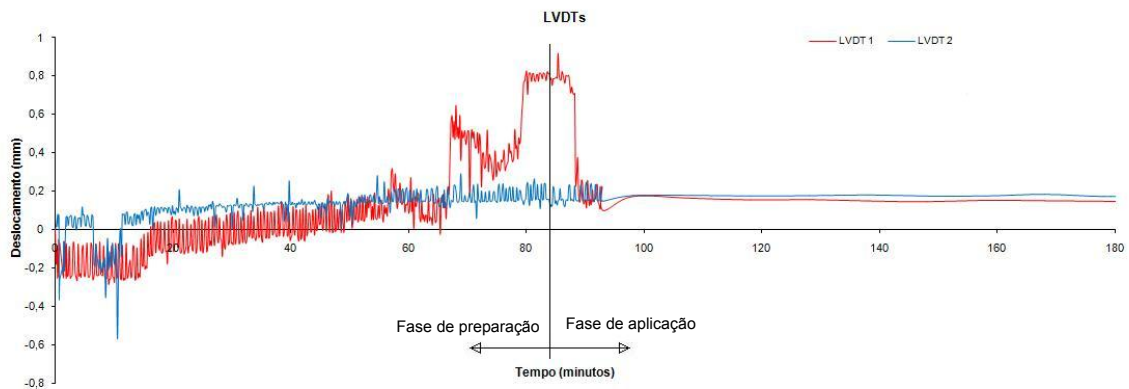


Figura 4.10 – Diagrama de Deslocamentos vs Tempo medidos pelos LVDT's (3 horas).

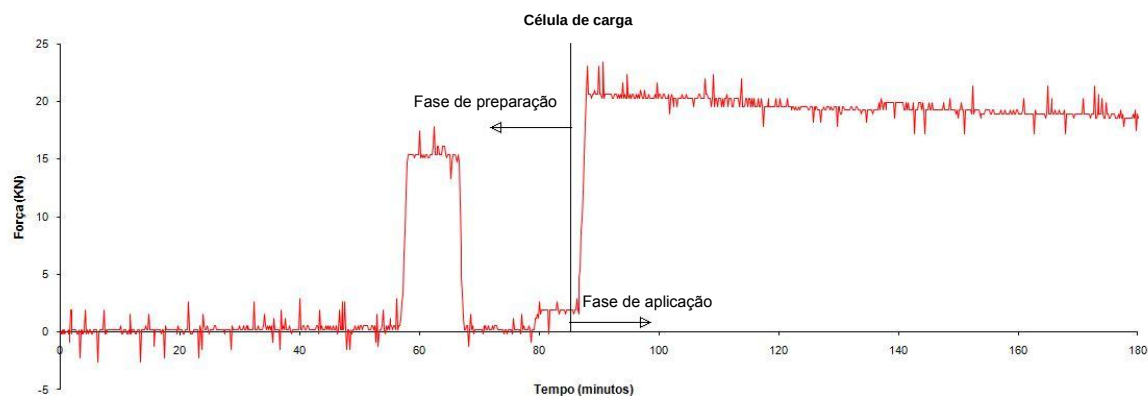


Figura 4.11 – Diagrama de Força vs Tempo instalada na célula de carga (3 horas).

A monitorização foi iniciada na etapa 7 do item 4.4. Assim, foi possível obter desde início os valores das extensões e identificar, caso exista, a descolagem das cabeças metálicas de aperto e de reacção.

Analisando a resposta dos 3 extensómetros (Figura 4.9), constata-se que as três curvas começam com um patamar que corresponde ao estado inicial em que ainda não foi aplicada nenhuma força ao tubo. A partir dos 10 minutos, começa-se a detectar alguma interferência que corresponde ao ajustamento das várias peças. Depois deste ajuste, a extensão aumenta consideravelmente, de forma irregular, até atingir um pico por volta dos 45 minutos. Esta subida deve-se ao aperto dos parafusos que, nesta altura, atingiram o limite de aperto. No entanto, a extensão só chegou a um valor médio de $7,9^{0}_{00}$, valor que está longe dos $9,6^{0}_{00}$ esperados (coluna correspondente a 70% do Quadro 4.1). Para atingir os objectivos, decide-se ajustar a porca de reacção 2 (Figura 4.1) ao esquadro de apoio e desapertar os parafusos de aperto. Depois, retirou-se o varão de aço do interior do tubo de GFRP. Ao retirar o varão de aço, percebeu-se que este inicialmente não estava em contacto com a cabeça de reacção, devido à existência de detritos de cola que tinham ficado a ocupar esse lugar, desde a altura das colagens. Para resolver este problema, inseriu-se uma ponta de aço com comprimento tal que, quando se voltasse a introduzir o varão de aço, este ficasse na posição inicial e fosse possível efectuar um novo aperto. Este segundo aperto identifica-se no gráfico pela subida das extensões que vai dos 67 aos 80 minutos. No final do aperto, obteve-se uma extensão média de $8,9^{0}_{00}$ que se encontra relativamente próxima de $9,6^{0}_{00}$. Após a aplicação (transferência da força para o sistema de apoio) a extensão média desceu para $7,8^{0}_{00}$, valor um pouco inferior aos $8,2^{0}_{00}$ esperados (coluna dos 60% do Quadro 4.1). O Quadro 4.2 resume a história dos valores relatados atrás.

Quadro 4.2 – Extensões mediadas no final do aperto e após aplicação.

Extensómetro	Extensão no final do aperto do varão	Extensão após aplicação do pré-esforço
1 (1/4 vão)	$8,5^{0}_{00}$	$7,6^{0}_{00}$
2 (1/2 vão)	$7,2^{0}_{00}$	$6,7^{0}_{00}$
3 (1/2 vão)	$11,0^{0}_{00}$	$9,0^{0}_{00}$
Média	$8,9^{0}_{00}$	$7,8^{0}_{00}$

Analisando a Figura 4.11, gráfico que representa a variação da força instalada na célula de carga no tempo, verifica-se que após um período de carga nula (até aos 55 minutos) tem-se uma subida repentina, depois da qual a carga atinge um valor de cerca de 15 kN. Esta alteração surge exactamente na altura em que a força do tubo é transferida para os apoios a fim de resolver o problema do varão de aço descrito no parágrafo anterior. Ao voltar a apertar os parafusos, a carga medida na célula volta a ser nula. A segunda subida do valor da carga coincide com o instante de aplicação do pré-esforço, em que o esforço exercido pelo GFRP passa a ser suportado pelo sistema de apoio. As oscilações constantes verificadas ao longo da curva deverão ser desprezadas por derivarem de defeitos da célula de carga. O declive negativo, apresentado após os 90 minutos, não se deve a uma diminuição da força exercida pelo cabo, mas sim à sensibilidade da célula de carga às variações de temperatura.

Da Figura 4.10, gráfico que representa os deslocamentos medidos pelos LVDT's, poucas ilações podem ser extraídas. Parte das oscilações verificadas são de valor desprezável e originadas pela não linearidade do tubo na altura em que está pré-esforçado, pelo que origina ligeiras rotações no local onde os LVDT's estão aplicados.

b) Acompanhamento ao longo do tempo

Esta análise incide na interpretação dos gráficos apresentados nas Figuras 4.6 a 4.8.

No gráfico que representa as extensões (Figura 4.6), detecta-se uma ligeira descida nas três curvas ilustradas. Este valor é desprezável e difícil de justificar, mas que se admite possa ter origem nas variações de temperatura que influenciam o sistema de leitura (dias muito quentes no mês de Maio).

Os deslocamentos iniciais, medidos pelos LVDT's (Figura 4.7), devem-se exclusivamente ao aumento de comprimento do troço de tubo que separa a parte onde o LVDT está fixo e a cabeça onde está colado o batente. A variação dos deslocamentos no tempo é insignificante, portanto pode-se concluir que não ocorreu qualquer fenómeno de descolagem das cabeças.

A célula de carga apresenta vários ciclos de subidas e descidas ao longo do tempo (Figura 4.8). Estes ciclos têm duração de um dia e devem-se principalmente às variações de temperatura a que fica sujeita a célula de carga, já que o aço e o GFRP apresentam coeficientes de dilatação térmica muito próximos (aço $14 \times 10^{-6}/k$ e GFRP $12 \times 10^{-6}/k$). No final dos 37 dias, o valor médio da carga registada ao longo de um ciclo encontra-se muito próximo dos valores iniciais (20,9KN), concluindo-se que não ocorreu relaxação neste período de tempo.

Tendo em conta o modo de elasticidade do tubo de GFRP calculado no capítulo 3 ($E_{fm} = 24,46$ GPa), é possível relacionar a extensão com a tensão calculada a partir da força medida pela célula de carga e vice-versa. Essa relação é apresentada no Quadro 4.3. Os valores referidos por (i) são os valores médios que se obtiveram directamente da leitura dos sensores instalados. Os outros valores (ii) são calculados a partir do módulo de elasticidade pela expressão da lei de Hooke, $\sigma = E \times \epsilon$.

Quadro 4.3 – Relação tensões vs extensões.

Valor calculado a partir dos dados recolhidos por:	Tensão	Extensão
Célula de carga	201,1MPa ⁽ⁱ⁾	8,2 ⁰ / ₀₀ ⁽ⁱⁱ⁾
Extensómetros	191.3MPa ⁽ⁱⁱ⁾	7,8 ⁰ / ₀₀ ⁽ⁱ⁾

⁽ⁱ⁾ – valores observados; ⁽ⁱⁱ⁾ – valores calculados pela lei de Hooke.

O valor da extensão, calculado a partir da tensão observada no GFRP, está próximo do valor médio dos extensómetros observados. Se atribuir menos importância aos resultados do extensómetro 3 (1/2 vão), é possível chegar a uma média ponderada de $8,2^{0}_{00}$.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Deste capítulo, conclui-se que a nova técnica de aplicação de pré-esforço a um tubo de GFRP, como o exposto neste trabalho, é um sistema fiável e exequível em futuras aplicações para elementos de betão armado.

Trata-se de um sistema mecânico simples, cuja técnica principal assenta na eficiência dos mecanismos da cabeça de aperto e da cabeça de reacção do cabo de GFRP através do controlo da deformação do sistema. Evita-se a aplicação de macaco de esticamento. O sistema implementado neste trabalho permitiu ajustar um pré-esforço no cabo na ordem de 70% da capacidade máxima do tubo de GFRP.

O exemplo executado em laboratório para aferir o comportamento desse modelo, quer na fase de aplicação do pré-esforço quer na fase de permanência da tensão, durante pelo menos 1 mês (até 37 dias), permitiu tirar várias ilações relativamente à variação da extensão do tubo, do escorregamento das cabeças de amarração e do valor da força efectiva no sistema pré-esforçado (valor da tensão no tubo).

No final dos 37 dias, constatou-se que o valor médio da carga registada no tubo é de 20,9kN (na ordem de 60% da capacidade última do GFRP) e que não ocorreu relaxação neste período de tempo.

Com apenas 37 dias de monitorização, não é possível prever se a longo prazo haverá perdas significativas de esforço. Para conseguir-se avaliar estas perdas, teria de se deixar decorrer a experiência durante um período mais longo. Contudo, foi possível concluir que, para uma extensão de cerca de $8,2^{0}_{00}$, correspondente a uma força de 20,9KN, as propriedades se mantêm constantes ao longo dos 37 dias. Este facto torna mais interessante a construção da viga do próximo capítulo 5.

5

VIGA DE BETÃO PRÉ-ESFORÇADO

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, pretende-se aplicar de forma prática a concepção de uma viga de betão armado pré-esforçada com um cabo de GFRP, de acordo com a técnica descrita nos capítulos anteriores. Apresenta-se com uma forte componente experimental, e termina com uma análise teórica do comportamento do modelo ensaiado de modo que, de forma combinadas, possam trazer um contributo na previsão do comportamento de vigas de betão armado pré-esforçadas pela nova técnica de pré-tensão de um tubo de GFRP.

Para o efeito, descrevem-se a geometria e os materiais usados na concepção da viga e expõe-se a preparação do cabo de pré-esforço e a sua pré-tensão, antes da betonagem do modelo. Posteriormente à betonagem da viga, expõe-se a técnica de transferência do pré-esforço do cabo, para a mesma, e a realização de um ensaio de flexão em 3 pontos. Por fim, os resultados são comentados e interpretados por uma análise simples e uma análise por um modelo numérico EVOLUTION de modo a extraírem-se ilações sobre o comportamento da viga pré-esforçada até à ruína. De forma conclusiva, resumem-se as principais considerações a reter deste capítulo.

5.2 GEOMETRIA E ARMADURA

Para construir a viga deste capítulo, vai-se usar um cabo semelhante ao testado no Capítulo 4. Este cabo apresenta um comprimento de 2,20 m, um diâmetro exterior de 14 mm e garante um pré-esforço mínimo de 20,9 kN. No caso de vigas simplesmente apoiadas, o Eurocódigo 2 (EC2, 2004) propõe uma relação vão/altura útil entre 14 e 20, caso o elemento seja fortemente ou levemente solicitado, respectivamente. Se existir pré-esforço, este valor pode ser ainda maior. A viga que se pretende construir tem um vão de 2 m. Se se considerar a relação máxima vão/altura útil de 20, implica que a altura útil seja de 10 cm. Se aos 10 cm, de altura útil, somar 2 cm, que se pensa ser uma distância razoável entre o eixo da armadura e a face da viga, tem-se uma altura de 12 cm. Uma largura de 8,5 cm é suficiente para poder colocar correctamente o cabo de pré-esforço e a armadura. Para armadura ordinária, propõe-se usar apenas 4 varões $\phi 6$. Assim, a acção do pré-esforço terá mais peso no comportamento final da viga. Como se trata de uma viga com uma relação vão/altura elevada, a ruptura por esforço transversal não é condicionante. No entanto, vai-se introduzir uma armadura mínima constituída por estribos $\phi 3$, com um espaçamento de 9 cm. A força do pré-esforço, para esta geometria, origina uma tensão de compressão média no betão de 2,05 MPa. Para tirar melhor proveito

do pré-esforço, definiu-se um traçado parabólico que contém o centro de gravidade das secções dos apoios e passa o mais próximo possível da face inferior da viga na zona de meio vão (afastado aproximadamente 2 cm). Na Figura 5.1 está esquematizada a viga a construir.

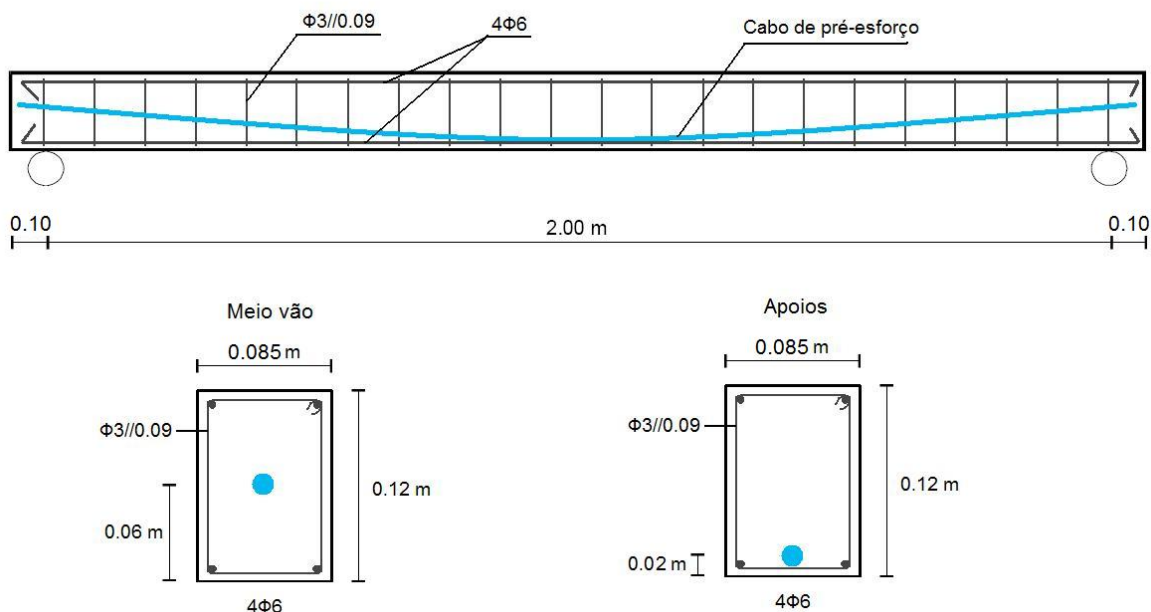


Figura 5.1 – Geometria e armadura da viga.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.3.1 BETÃO

O betão confeccionado para a construção desta viga foi fornecido pelo LEMC (Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção). Em anexo, é apresentada a ficha técnica de caracterização mecânica do betão executado pelo LEMC. A partir do valor da resistência média do betão à compressão, aos 28 dias, obtido de cubos de 15cm, presentes na ficha técnica, e tendo em conta as relações propostas nos documentos NP-ENV 206, (1993) e o EC2 (EC2, 2004), foi possível determinar as restantes propriedades mecânicas resumidas no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Características do betão aos 28 dias.

Amassadura data	f_{cm}^{cub} (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{ck} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	E_{cm} (GPa)	Classe de betão
7/06/2010	31,5	25,2	27,5	2,3	29,0	C20/25

O valor da resistência média à compressão em cubos (f_{cm}^{cub}) é a média das resistências dos 3 cubos ensaiados aos 28 dias.

O valor da resistência média à compressão em cilindros (f_{cm}) aos 28 dias foi calculado a partir do valor obtido nos cubos e convertido pela seguinte expressão:

$$f_{cm} = 0,8 \times f_{cm}^{cub} \quad (5.1)$$

O valor da resistência característica à compressão (f_{ck}) aos 28 dias foi calculado a partir da seguinte fórmula (NP206, 1993):

$$f_{ck} = f_{cm} - 4 \text{ (MPa)} \quad (5.2)$$

O valor da resistência média à tracção (f_{ctm}) aos 28 dias foi determinado a partir da seguinte fórmula (EC2, 2004):

$$f_{ctm} = 0,3 \times f_{ck}^{2/3} \quad (5.3)$$

O valor do módulo de elasticidade médio (E_{cm}) aos 28 dias foi avaliado a partir da seguinte fórmula (EC2, 2004):

$$E_{cm} = 22 \times \left[\frac{f_{cm}}{10} \right]^{0,3} \text{ (MPa)} \quad (5.4)$$

De acordo com o EC2, o valor da resistência característica à compressão de 27,5 MPa cumpre os requisitos do betão de classe C20/25.

5.3.2 Aço

Para armadura ordinária usaram-se varões disponíveis no LABEST e cuja caracterização em termos mecânicos foi disponibilizada por este. No Quadro 5.2 expõem-se os valores das propriedades mecânicas dos aços.

Quadro 5.2 – Características médias do aço.

Diametro (mm)	f_{sym} (MPa)	f_{sum} (MPa)	E_{sm} (GPa)	$\epsilon_{su,m}$ (%)
6	505,0	639,0	193,9	15,0
3	252,3	361,6	227,3	35,4

As características gerais do varão de pré-esforço usado no cabo pré-tensionado definido no item 4.2, estão resumidas na tabela técnica incluída em anexo.

5.3.3 GFRP

As características do tubo de GFRP foram determinadas a partir de ensaios de tracção descritos no Capítulo 3 e que aqui se resumem nos valores médios expostos no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Características média do GFRP.

Propriedade	Valor
Modo de elasticidade médio (E_{fm})	24,46 GPa
Desvio padrão σ_{Efm}	0,987976
Tensão última média ($f_{fu,m}$)	334,58 MPa
Extensão última média ($\epsilon_{fu,m}$)	13,67 ‰

5.4 PREPARAÇÃO DO CABO

A preparação do cabo de pré-esforço foi efectuada do mesmo modo que a referida no item 4.4, fase (i). Contudo, revestiu-se a superfície do tubo por colagem prévia de uma areia de sílica com vista a proporcionar melhor aderência ao betão. A cola utilizada nesse revestimento foi a Araldite 420, descrita no Capítulo 3, também usada na colagem das extremidades metálicas ao tubo. A Figura 5.2 ilustra o momento de aplicação desse revestimento.



Figura 5.2 – Aplicação do revestimento.

Uma hora depois, inesperadamente, ocorreu a ruptura brusca do cabo de GFRP. A Figura 5.3 procura ilustrar o aspecto da zona de ruína do cabo, exibindo uma extensão razoável de desfiamento das fibras de vidro e ausência da matriz plástica.

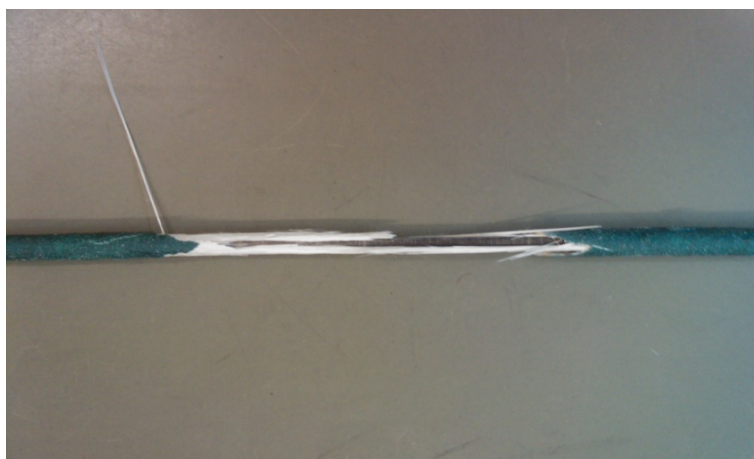


Figura 5.3 – Ruptura do tubo de GFRP.

Aparentemente, não se depreende o motivo ruptura do tubo. O pré-esforço aplicado foi de modo igual ao do cabo testado no Capítulo 4. Relativamente a este, como descrito acima, há acrescido a colagem superficial de uma areia para permitir aderência do cabo ao betão. Uma possível interpretação da ruptura é a da cola ter interferido na rigidez do cabo. Como a distribuição da cola não é uniforme ao longo do seu comprimento, o aumento de rigidez também não vai ser constante, criando-se zonas

reforçadas e zonas em que esse aumento é reduzido. Ao pré-tensionar o tubo, a deformação tende a concentrar-se nas zonas de menor rigidez (menos reforçadas), podendo ultrapassar os limites de resistência do GFRP.

Dessa forma, a partir das extremidades intactas do cabo, procurou-se caracterizar um provete de GFRP, assim revestido, em termos de resistência à tracção. Na Figura 5.4 ilustra-se o aspecto desse provete, antes e após o ensaio de tracção simples do tubo.



Figura 5.4 – Provete submetido ao ensaio de tracção.

O provete foi submetido ao ensaio de tracção uniaxial, cuja curva de tensão vs extensão se ilustra na Figura 5.5. Nesta, exibem-se o diagrama obtido por medição do extensómetro exigido pela norma (curva a vermelho) e o diagrama adquirido pelo extensómetro interno da prensa (curva a azul). Do primeiro retira-se a informação do módulo de elasticidade e do segundo o valor da carga última.

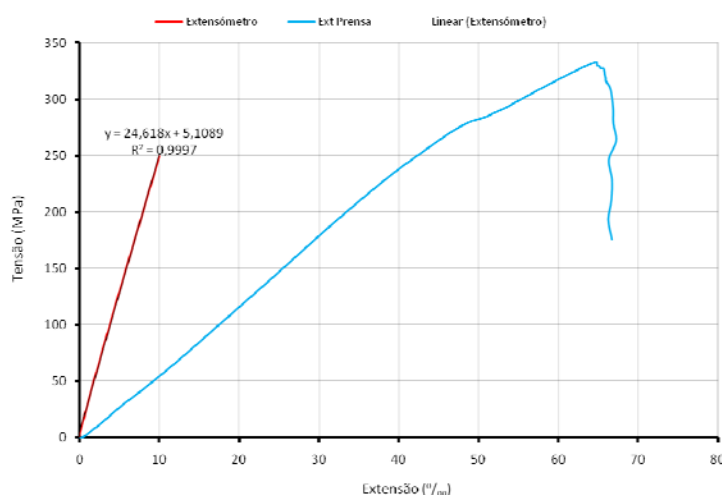


Figura 5.5 – Ensaio do provete construído a partir do tubo que rompeu.

No Quadro 5.4 comparam-se os valores do modo de elasticidade e da tensão última do tubo, com e sem revestimento. As variações do modo de elasticidade e da tensão última não são significativas. Conclui-se, que o revestimento aplicado não foi a causa da ruptura do tubo. Sem outra causa aparente, atribui-se a causa da ruptura a algum defeito de fabrico na pultrusão do tubo de GFRP.

Quadro 5.4 – Características do tubo sem e com revestimento.

Características	Sem revestimento	Com revestimento	Variação
Módulo de elasticidade (E)	24,46 GPa	24,62 GPa	+0,16 GPa
Tensão última (σ_u)	334,58 MPa	332,87 MPa	-1.71 MPa

Para prosseguir com o trabalho, antes de fazer os testes da interferência do revestimento, foi necessário avançar com a preparação de um outro varão. Como havia duvidas se a cola tinha interferido, decidiu-se neste novo tubo aplicar o revestimento com outra cola. Neste caso, usou-se a cola Bettor Resin 55 (MBRACE, 2006) referida no Capítulo 3. A Figura 5.6 ilustra o segundo tubo com a forma concluída

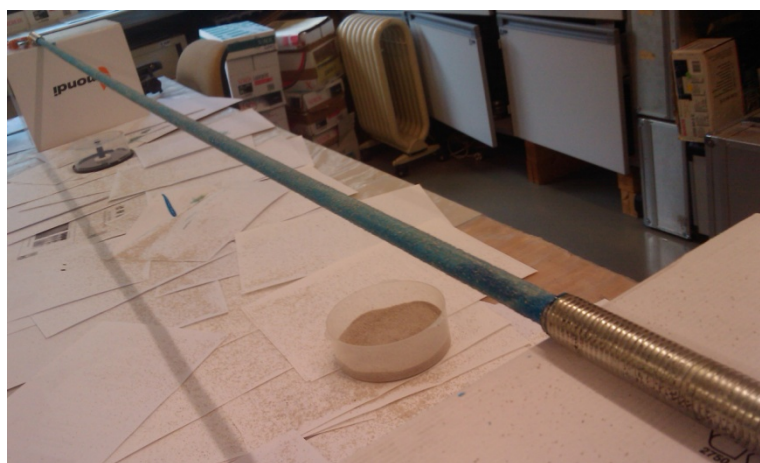


Figura 5.6 – Tubo de GFRP revestido com resina Bettor Resin 55 e areia.

Este novo cabo de GFRP foi pré-tensionado de forma idêntica ao descrito do Capítulo 4, não se registando qualquer tipo de anomalia.

5.5 PREPARAÇÃO DA VIGA, ENSAIO E RESULTADOS

Cumpridas as etapas definidas no item 4.4, fase (i), o cabo ficou disponível para se executar o modelo experimental de betão armado. Com este cabo e com a armadura ordinária de aço (Figura 5.7) preparou-se a cofragem e instalou-se o GFRP de modo a implantar-se uma curvatura com flecha máxima na secção de meio vão, de acordo com a Figura 5.8. O traçado do cabo obedeceu ao requisito de ser uma curva que passa no centro de gravidade das secções de apoio do ensaio e a uma distância de 2 cm da face inferior da viga. Posteriormente, a viga foi betonada e decorridos 28 dias foi submetida ao ensaio de flexão em 3 pontos.

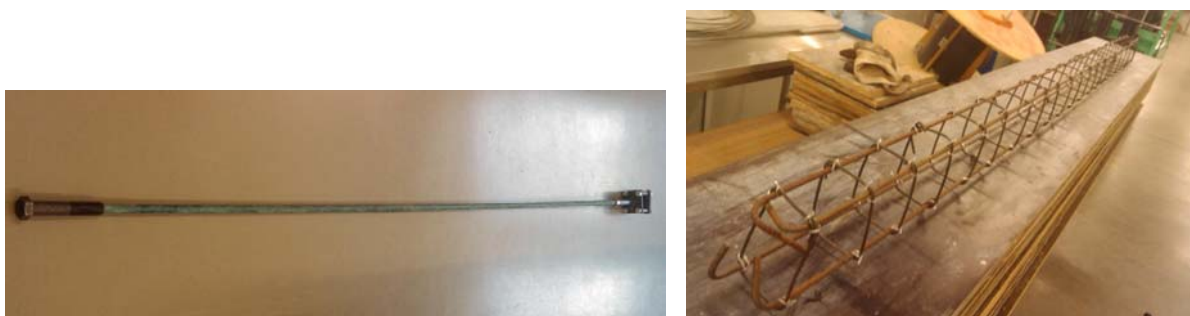


Figura 5.7 – Cabo e armadura ordinária utilizados na viga..

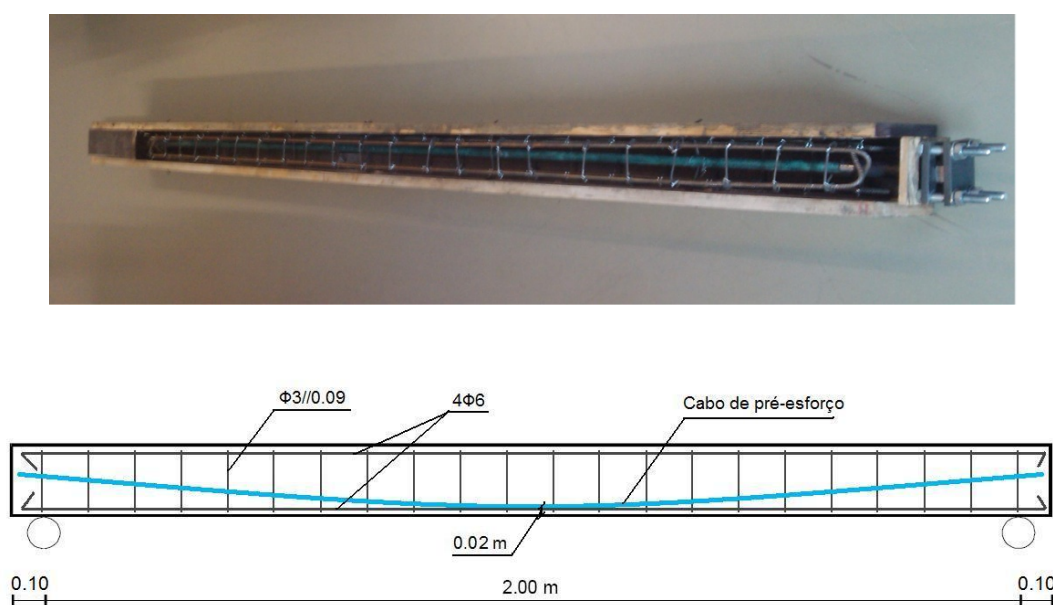


Figura 5.8 – Aspecto final da cofragem e do traçado do cabo do modelo experimental.

Constituída a viga de betão armado, a etapa de pré-esforço será aplicada antes de se submeter o modelo ao ensaio de flexão em 3 pontos. Esta fase merece alguma atenção e descreve-se no item seguinte.

5.5.1 APLICAÇÃO DO PRÉ-ESFORÇO

Após a viga de betão armado obter consistência estrutural (cura aos 28 dias), a pré-tensão do cabo de GFRP vai ser transferida à viga por pré-esforço aderente GFRP-betão ao longo de todo o seu comprimento. Estima-se que o valor da força de pré-esforço seja aproximadamente de 20,9 kN (concluído no capítulo 4).

Para se conhecer o valor da contra flecha causada pelo pré-esforço decidiu-se iniciar a monitorização antes de aplicar o pré-esforço. Esta monitorização é constituída por 3 LVDT's colocados sob a viga em posições definidas na Figura 5.9.

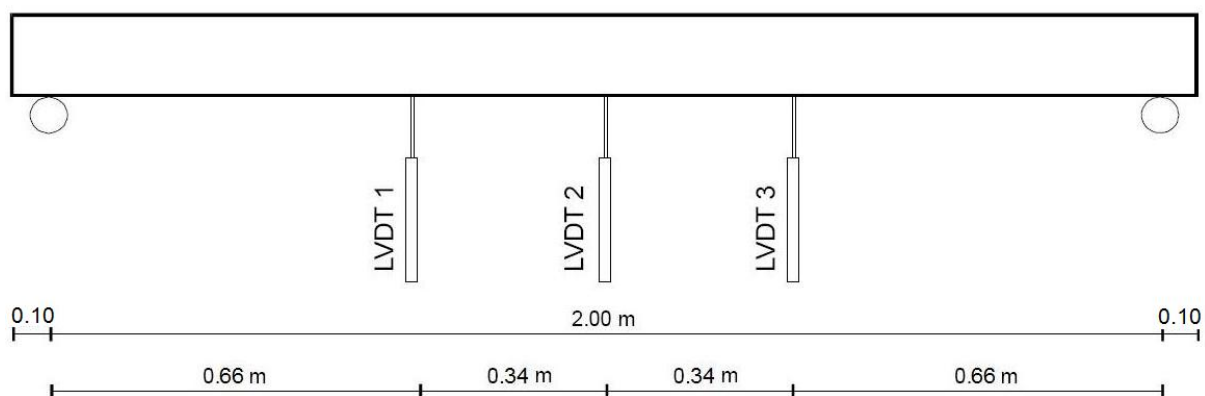


Figura 5.9 – Esquema de instrumentação da fase de pré-esforço.

Depois de colocada a viga no pórtico de ensaio e de os LVDT's correctamente posicionados (Figura 10), deu-se início à aplicação do pré-esforço.

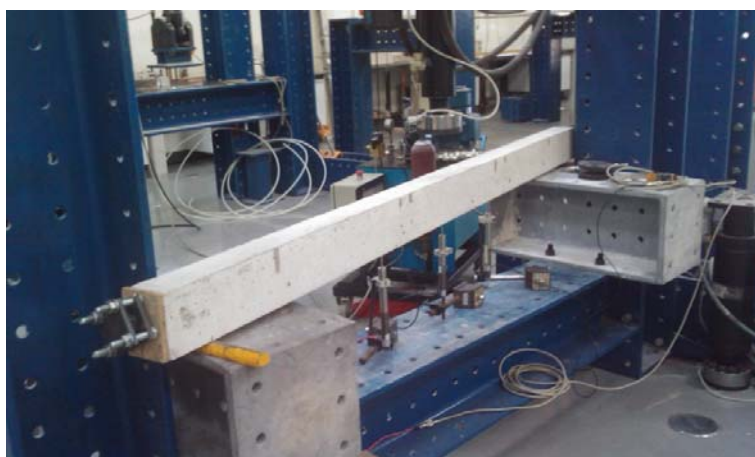


Figura 5.10 – Aspecto geral do modelo experimental no pórtico de ensaio.

Para aplicar o pré-esforço bastou desapertar os parafusos da “cabeça de aperto” (Figura 5.11 a). De seguida, retirou-se a cabeça e o varão de aço que estava no interior do tubo de GFRP já que depois desta fase deixam de ser necessários. A Figura 5.11 ilustra estas operações.



a) Desaperto dos parafusos.

b) Remoção do varão de aço

Figura 5.11 – Aplicação do pré-esforço.

O gráfico da Figura 5.12 traduz os deslocamentos verticais de 3 secções da viga, medidos pelos LVDT's 1 a 3, na altura de aplicação do pré-esforço.

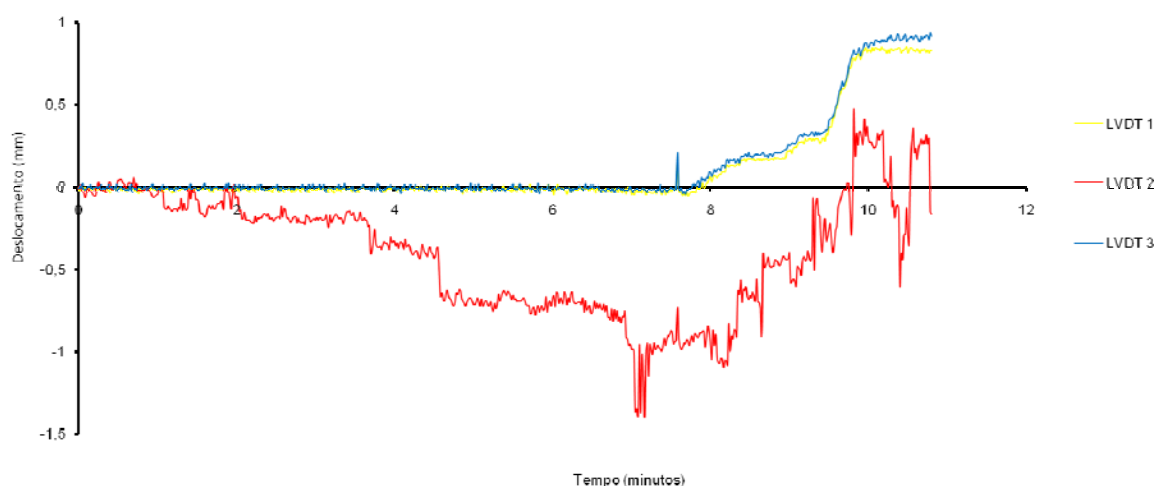


Figura 5.12 – Deslocamentos medidos na altura de aplicação do pré-esforço.

Era de esperar que os LVDT's 1 e 3 medissem deslocamentos verticais com valores semelhantes, confirmado por observação na figura e cujo valor máximo registado é cerca de 0,9 mm. Quanto ao deslocamento medido pelo LVDT 2, conclui-se que a resposta obtida não faz qualquer sentido pois apresenta valores estranhos. O deslocamento a meio vão devia ser ligeiramente superior aos medidos nas posições de 1/3 de vão. Assim esta leitura será desprezada.

Antes de aplicar a carga, a viga foi deixada em repouso durante 24 horas. Ao longo dessas 24 horas manteve-se a monitorização. Os valores dos deslocamentos verticais medidos nas fases após pré-esforço e após 24h são apresentados no Quadro 5.5. Como se perdeu o valor do LVDT 2 na primeira situação, procurou-se estimar o mesmo a partir dos observados nos dois LVDTs 1 e 3.

Se admitirmos que a deformada tem a forma de uma parábola podemos deduzir o deslocamento a meio vão a partir dos valores para 1/3 de vão. A Figura 5.13 representa as grandezas utilizadas para o cálculo desse deslocamento. O referencial escolhido tem o ponto de origem fixo na viga a meio vão e

desloca-se igualmente ao ponto médio da viga. As equações 5.5 a 5.8 fazem a dedução do deslocamento.

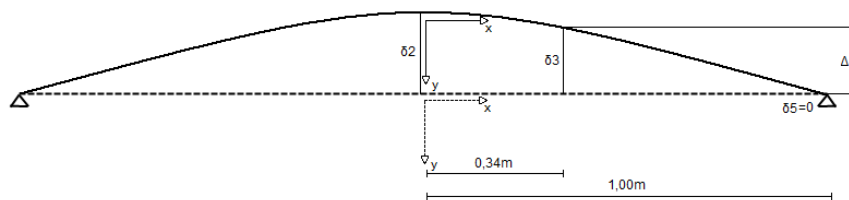


Figura 5.13 – Cálculo do deslocamento a meio vão.

$$\Delta = \delta_3 - \delta_5 \cong \delta_3 \quad (5.5)$$

$$\Delta = k \times x_5^2 - k \times x_3^2 \quad (5.6)$$

$$1,1 = k \times 1^2 - k \times 0,34^2 \rightarrow k = 1,24$$

$$y = 1,24 \times x^2 \quad (5.7)$$

$$\delta_2(x = 0) = y(x = 1,0) = 1,24 \times 1^2 = 1,24mm \quad (5.8)$$

Quadro 5.5 – Deslocamentos devidos ao pré-esforço.

	Deslocamento após aplicação	Deslocamento ao fim de 24 hors
LVDT 1	0,9 mm	1.1 mm
LVDT 2	-	1,2 mm
LVDT 3	0,9 mm	1.1 mm

Em resumo, estima-se que o pré-esforço causou uma contra-flecha de 1,2 mm a meio vão.

5.5.2 ENSAIO DE CARGA

Depois de conhecer o valor da contra-flecha produzida pelo pré-esforço, procedeu-se á realização do ensaio de carga da viga pré-esforçada para se conhecer o seu comportamento face a solicitações exteriores. Decidiu-se por um ensaio de flexão em 3 pontos. Este ensaio foi efectuado recorrendo a um pórtico considerado infinitamente rígido disponível no LABEST (Figura 5.14). Em termos de instrumentação, além dos 3 LVDT's seleccionados no ensaio anterior, foram colocados mais dois, um por cima de cada apoio para identificar possíveis deslocamentos nos apoios. Na Figura 5.15 identificam-se as posições dos LVDT's, dos apoios e o critério de aplicação da carga.

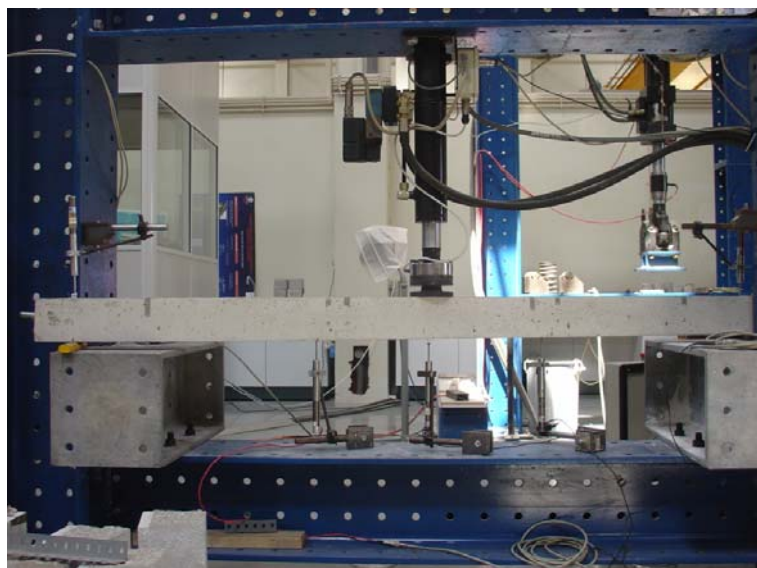


Figura 5.14 – Aspecto geral do ensaio de flexão em 3 pontos.

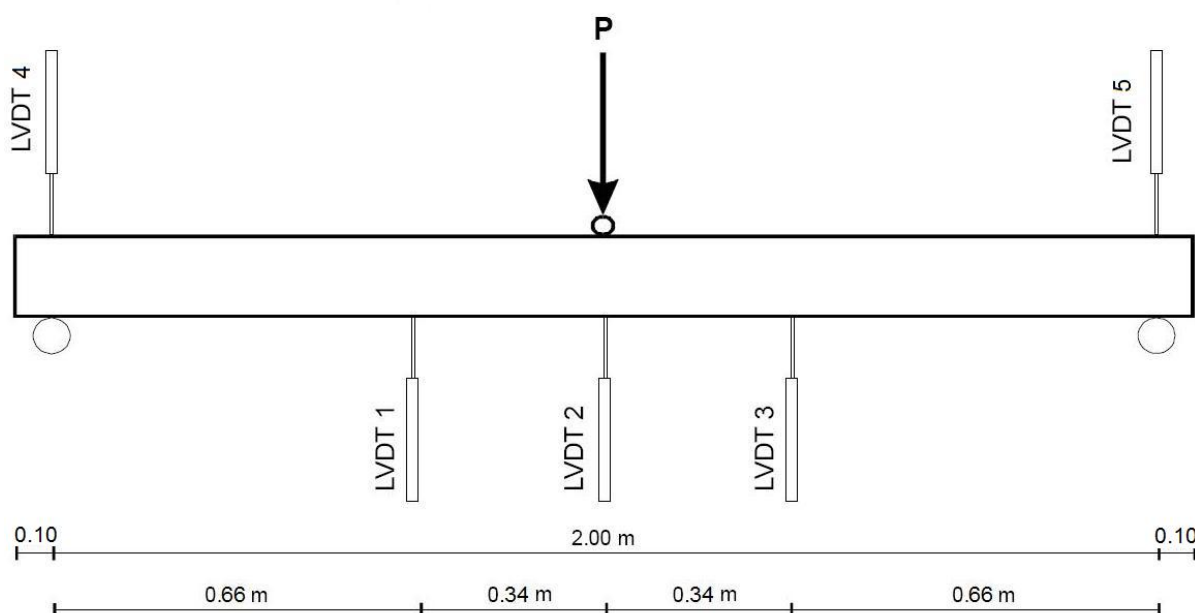


Figura 5.15 – Esquema de instrumentação do ensaio de flexão.

Como nesta fase se desconhece o comportamento do modelo, por se tratar de uma técnica nova, resolveu-se ensaiar a viga até uma carga ligeiramente superior à carga de início de fendilhação. Por se entender ser mais adequado na exposição dos assuntos, a análise de previsão do comportamento do modelo será retratada no próximo item 5.6, com os resultados obtidos nesta fase experimental.

Desse modo, o ensaio de flexão realizou-se impondo carga crescente até 7,5 kN e com uma velocidade do actuador de 0,005 mm/s, seguindo-se a descarga. A resposta da viga nas secções de localização dos

LVDTs em termos de carga aplicada vs deslocamento vertical está ilustrada na Figura 5.16. Por questões de erro de programação do sistema de aquisição de dados, neste ensaio apenas se dispõe dos dados do ramo de carga.

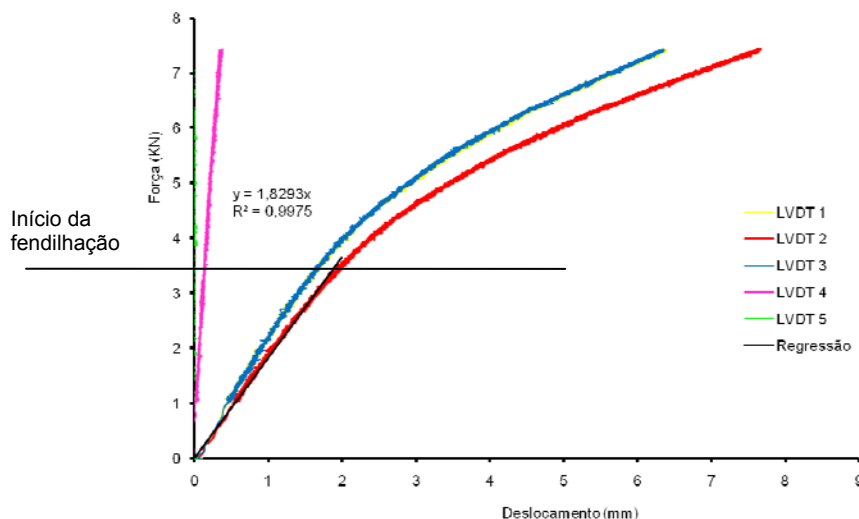


Figura 5.16 – Diagramas “carga aplicada vs deslocamento vertical” até 7,5kN.

As curvas da figura estão de acordo com o comportamento esperado. Os deslocamentos dos apoios não são significativos (LVDT's 4 e 5). Os LVDT's 1 e 3 apresentam praticamente os mesmos valores de deslocamentos o que era espectável, já que se encontram em posições simétricas. O valor da flecha central para a carga máxima foi de 7,6mm.

Para identificar o valor da carga de início de fendilhação, foi apenas analisada a evolução do deslocamento a meio vão. O início de fendilhação de uma viga é identificado por uma quebra de rigidez e perda de linearidade na curva de resposta da viga em serviço. Esse momento identifica-se no gráfico para uma carga de cerca de 3,5 kN. Abaixo desse valor, a curva apresenta um declive superior ao declive para cargas superiores, com mudança de direcção. Foi feita uma regressão linear para evidenciar o comportamento linear até à carga de fendilhação.

Por observação visual da viga foi identificado o padrão de fendilhação registado nas faces do modelo para diferentes valores de carga (Figura 5.17). Sublinhe-se que a observação visual efectuada no ensaio apenas detectou a formação da 1ª fenda por volta dos 5kN, superior ao obtido no gráfico.

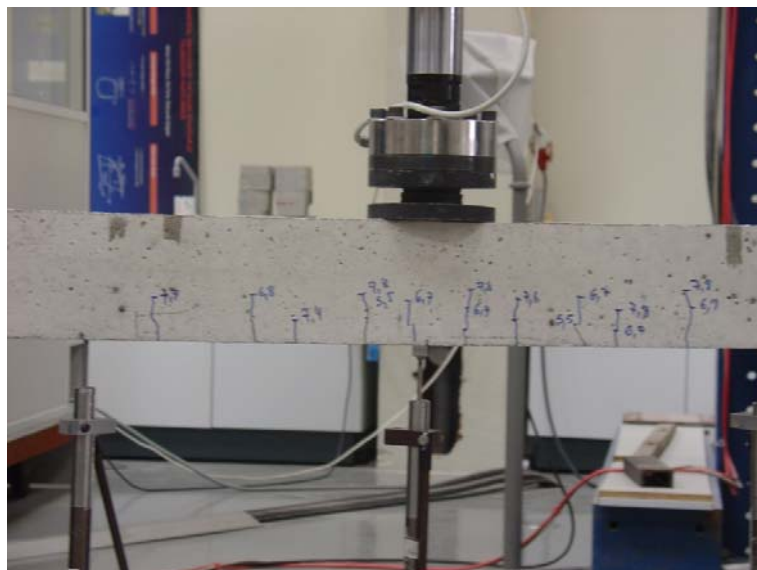


Figura 5.17 – Padrão de fendilhação registado no ensaio.

Face ao ocorrido no 1º ensaio e à necessidade de se registar uma descarga nesta fase de comportamento da viga, procedeu-se a um 2º carregamento com carga crescente até 8,1 kN, mas, por razões técnicas, os dados do ensaio foram perdidos. Então, decidiu-se fazer um 3º ensaio até uma carga idêntica ao anterior, de modo a prevenir uma possível ruptura, que podia danificar os LVDT's. Nesta fase de carga (de 8 kN), não se conseguiu registar a rigidez inicial da viga, face à instalação de um padrão de fendilhação devido ao carregamento anterior de 8,1 kN. Contudo, constatou-se um refechamento das fendas na fase de descarga, devido ao efeito do pré-esforço. No gráfico da Figura 5.18 registam-se as curvas de carga aplicada vs deslocamento vertical a meio vão correspondente ao 1º ensaio e ao último ciclo de carga-descarga a que a viga foi sujeita. Para este 3º carregamento a fecha atingiu um valor na ordem de 9mm.

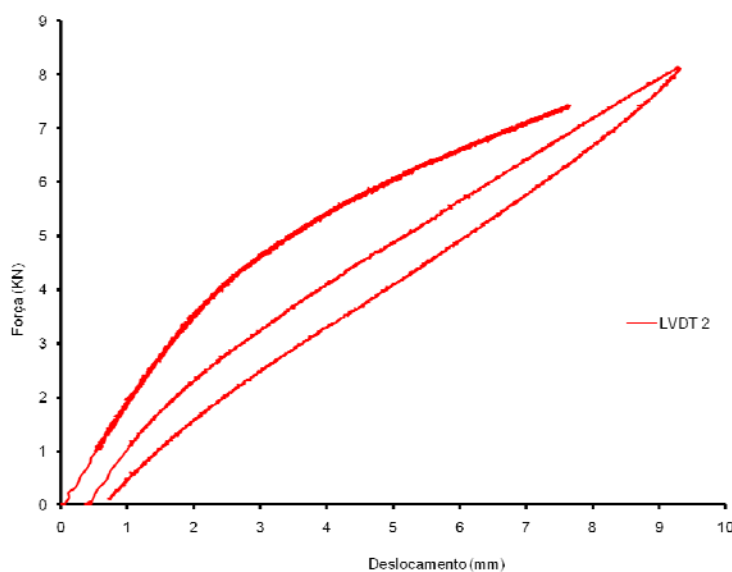


Figura 5.18 – Ciclo de carga-descarga.

No ciclo de carga-descarga é possível identificar dois declives. Um declive mais acentuado, até 2,5 kN, e um outro mais suave a partir dessa carga. O declive mais acentuado deve-se ao contributo do betão, enquanto as fendas estão fechadas, em consequência do efeito do pré-esforço. Do primeiro ensaio para o terceiro, o troço com maior declive perdeu cerca de 1 kN. Esta diferença deve-se à falta do contributo do betão à tracção que agora está fendilhado, apesar de pré-esforçado. Após a aplicação destas cargas, a viga não recuperou exactamente a posição inicial. Isto é perceptível no gráfico pelas distâncias do início e do final da curva carga-descarga, relativamente à origem. Esta não recuperação pode dever-se a algum esmagamento do betão ou plastificação da armadura, hipóteses a serem avaliadas a seguir por análise numérica do modelo experimental.

5.6 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO

Nesta fase do trabalho, é importante perceber o comportamento do modelo de viga de betão armado pré-esforçado com o cabo (tubo) de GFRP, descrito nos itens anteriores. Este objectivo está patente quer em fase de concepção do modelo experimental, para controlo da geometria, dos materiais e resposta da viga em serviço, quer após a realização do ensaio de flexão em 3 pontos de modo a se ajustar um modelo de previsão do comportamento em serviço e em estado limite último.

Independentemente da ordem cronológica das análises, neste estudo realizam-se dois tipos de análise, sendo uma de “Análise Simples”, a partir dos conhecimentos de Resistência dos Materiais e de Betão Armado (Figueiras, 1993) e outra mais complexa, recorrendo a um modelo computacional desenvolvido para a análise estrutural de obras de arte designado “Evolution” (Ferraz, 2010).

5.6.1 ANÁLISE SIMPLES

Com vista a ter-se uma ideia do comportamento em serviço da viga pré-esforçada com o cabo de GFRP, foi essencial prever o valor da carga de início de fendilhação (P_{cr}) do modelo experimental na secção transversal a meio vão, face aos critérios expostos nos capítulos anteriores a respeito da concepção da nova técnica de pré-esforço. De forma simples, recorreram-se aos critérios de Resistência dos Materiais e de Betão Armado para avaliar essa carga, na situação de viga de betão armado e de viga de betão armado com pré-esforço do GFRP.

Para uma viga simplesmente apoiada e carregada a meio vão por uma carga concentrada P tem-se que a expressão da carga P_{cr} resulta de:

$$M = \frac{PL}{4} \rightarrow P_{cr} = \frac{4M_{cr}}{L} \quad (5.9)$$

i) No caso da viga sem pré-esforço (betão armado):

$$M_{cr} = \frac{\sigma_{ctm} \times \bar{I}_c}{y_i} \quad (5.10)$$

$$\bar{I}_c = I_c + (m - 1) \times I_s \quad (5.11)$$

$$m = \frac{E_s}{E_c} \quad (5.12)$$

$$m = 6,65$$

$$\bar{I}_c = 1448,26 \text{ cm}^4$$

$$M_{cr} = 0,56 \text{ KN.m}$$

$$P_{cr} = 1,11 \text{ KN.m}$$

ii) No caso da viga com pré-esforço:

$$\sigma_P + \sigma_{\text{pré-esforço}} \leq \sigma_{ctm} \quad (5.13)$$

Sinal positivo para a compressão.

$$\sigma_P = \frac{M_{P_{cr}}}{I_c} \times y_i \quad (5.14)$$

$$\sigma_{\text{pré-esforço}} = \frac{Q}{A_c} + \frac{Q \times e}{I_c} \times y_i \quad (5.15)$$

$$M_{P_{cr}} = \frac{P_{cr} L}{4} \quad (5.16)$$

$y_i \rightarrow$ Distância do centro de gravidade à fibra mais afastada = 6 cm

$$\overline{A_c} = A_c + m \times A_s = 114,39 \text{ cm}^2$$

$Q \rightarrow$ Força do pré – esforço = 20,9 kN

$e \rightarrow$ Excentricidade do pré – esforço = 4 cm

$\sigma_{ctm} \rightarrow$ Tensão resistente do betão à tracção (f_{ctm} do Quadro 5.1) = -2,3 MPa

Resolvendo em ordem a P_{cr} obtemos:

$$P_{cr} = -3,66 \text{ kN} \quad (\text{sinal negativo significa sentido descendente})$$

Complementarmente, procurou-se estimar os valores da carga aplicada à viga que conduz ao início de cedência da armadura ordinária e da carga que produz o colapso da viga. No primeiro caso, o cálculo foi realizado admitindo que a armadura e o tubo de GFRP atingem, em simultâneo, o valor da extensão de início de plastificação do aço. No segundo caso admite-se que a ruína ocorre por esgotamento do tubo de GFRP, com a armadura ordinária em patamar de plastificação. No quadro 5.6, expõem-se os resultados estimados para as três situações descritas, recorrendo à análise simples de Resistência de Materiais e de Betão Armado.

Quadro 5.6 – Estimativa de cargas pela análise simples.

Situação	Carga aplicada (kN)
1ª fenda no betão (P_{cr})	3,7
Cedência da armadura	11,2
Ruína da viga	12,6

O valor carga de fendilhação (P_{cr}) para a viga pré-esforçada calculada a partir das expressões do betão armado (3,66 kN) é muito próximo do valor obtido experimentalmente (3,55 kN). Esta ligeira diferença pode estar relacionada com alguma incerteza quanto valor do pré-esforço ou da tensão de fendilhação do betão. Conclui-se que, o pré-esforço conduziu a uma carga de fendilhação que é cerca de 3 vezes maior do que no caso de ausência de pré-esforço. Nesta fase, não se comenta os valores da carga de cedência e da carga de ruína porque o ensaio foi executado somente até 7,5 kN.

5.6.2 ANÁLISE PELO PROGRAMA EVOLUTION

Recorrendo a um modelo computacional, desenvolvido por Miguel Ferraz (Ferraz, 2010) de análise estrutural, baseado no método dos elementos finitos (MEF) apoiado na formulação tridimensional de elementos de viga de Timoshenko, usando uma discretização da secção transversal por fibras (camadas), foi possível avaliar a previsão de desempenho do modelo experimental testado neste capítulo (Figura 5.19). Para a modelação de cabos de pré-esforço aderentes (rectilíneos ou curvos) utilizou-se uma formulação específica implementada no referido modelo computacional e adequada a vários tipos de elementos finitos.

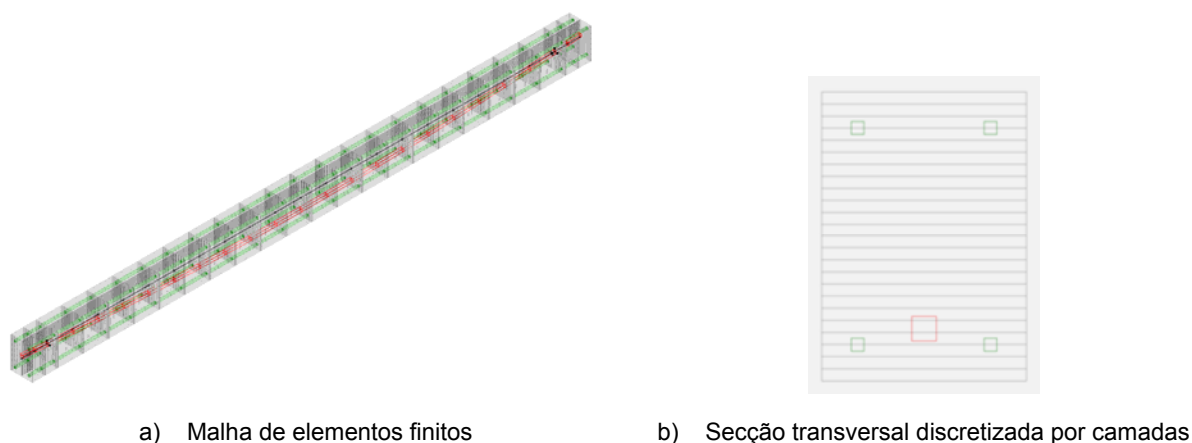


Figura 5.19 – Critérios para a discretização da viga.

Na análise numérica foram utilizadas leis constitutivas não lineares para os materiais que se expõem nas Figuras 5.20, 5.21 e 5.22. Refira-se que os parâmetros de calibração das leis foram retirados dos valores médios das características mecânicas obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais usados na execução do modelo experimental.

- i) Cabo de GFRP – definiu-se com um comportamento linear sem reserva plástica como se exhibe na Figura 5.20;
- ii) Betão – considerou-se um modelo simples para o comportamento à compressão e à tracção, neste último admitindo o efeito de “tension stiffening” como se ilustra na Figura 5.21;
- iii) Armaduras ordinárias de aço – definiu-se um comportamento bi-linear que se ajustou ao comportamento elástico-plástico com endurecimento ilustrado na Figura 5.22.

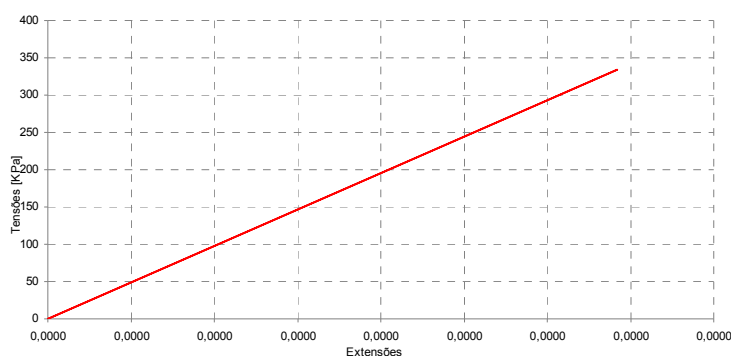


Figura 5.20 – Curva de tensão vs extensão (só tracção) do cabo de GFRP.

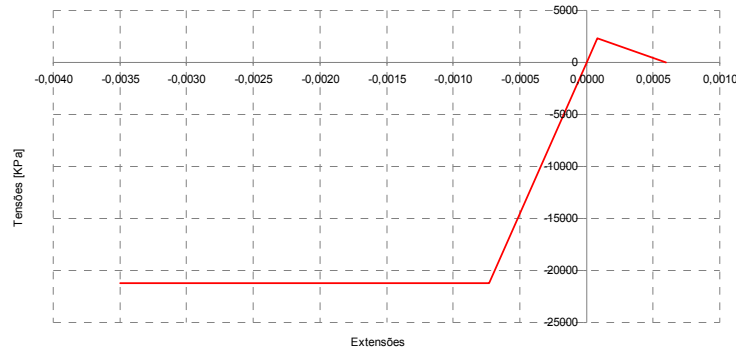


Figura 5.21 – Curva de tensão vs extensão (tração e compressão) do betão.

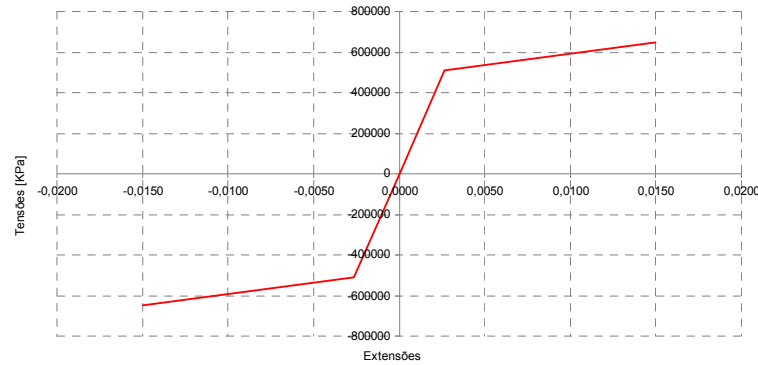


Figura 5.22 – Curva de tensão vs extensão (tração e compressão) do aço da armadura ordinária.

O primeiro objectivo desta análise numérica é ajustar os parâmetros das leis constitutivas de modo a, posteriormente, se prever, de forma adequada, o comportamento até à ruptura do modelo experimental de viga de betão armado pré-esforçada com o tubo de GFRP. Pretende-se obter a resposta desse comportamento, para a secção a meio vão, sob a forma de diagramas do tipo: carga aplicada vs deslocamento vertical; tensão normal vs extensão do betão, nas fibras mais comprimida e mais traccionada; tensão normal vs extensão das armaduras ordinárias de aço superior e inferior; tensão normal vs extensão do cabo de GFRP. A simulação do carregamento, até à rotura da viga, no modelo numérico foi efectuada através de incrementos de deslocamentos verticais, impostos a meio vão desta. Utilizaram-se dois critérios de convergência para controlo do processo iterativo, designadamente em deslocamentos e em forças, ambos com tolerância de 1/1000 (Ferraz, 2010), sendo que o condicionante foi o critério em forças, como seria previsível.

Admitindo as características do ensaio descritas atrás e da modelação definida para a análise do comportamento do modelo de viga testado, obtêm-se as curvas numérica e experimental da carga aplicada vs deslocamento vertical ilustradas na Figura 5.23, que representam o comportamento global da viga de betão armado com e sem pré-esforço (P.E) para a secção a meio vão.

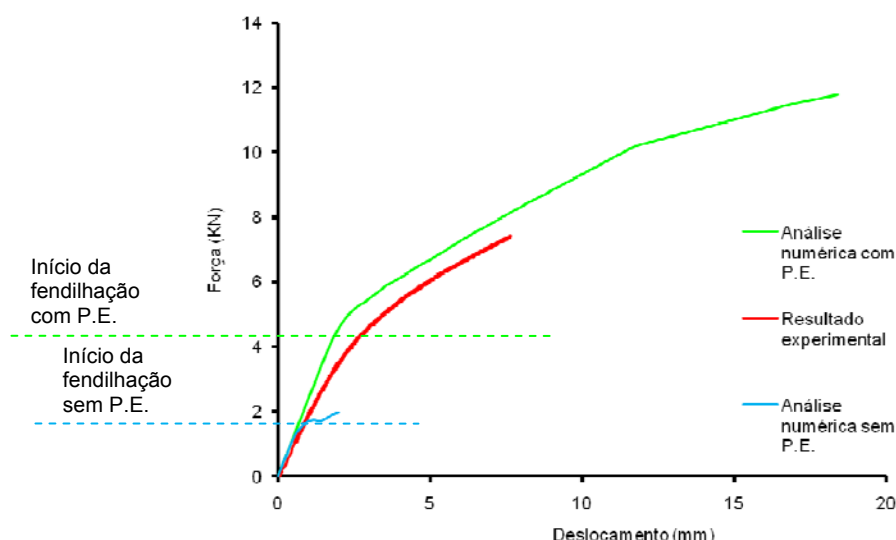


Figura 5.23 – Diagramas “carga aplicada vs deslocamento vertical” dos modelos numérico e experimental.

De um modo geral, a curva de previsão numérica acompanha a forma típica da resposta da viga experimental, até ao valor da carga de ensaio (7,5kN).

Contudo, nota-se uma maior rigidez da primeira relativamente à segunda, na fase de comportamento linear, até à abertura da 1ª fenda. Este facto, proporciona o afastamento da curva numérica da experimental nessa zona. Além disso, a carga de início de fendilhação é cerca de 4,2 kN, maior que os 3,5 kN observados experimentalmente. Uma justificação para este facto poderá advir da necessidade de reajustar a lei constitutiva do betão na fase de tracção, pondo-se em causa o valor médio da resistência à tracção (incertezas das características dos materiais) e o contributo do betão entre fendas, na fase fendilhada do viga. Acresce-se que o valor exacto do pré-esforço, também pode contribuir para esta discrepância.

Apesar destes factos, pode-se avançar que o estudo numérico estima os valores indicados no Quadro 5.7 para a carga aplicada e o deslocamento vertical, em três situações importantes do comportamento da viga. Concluiu-se que a ruína ocorre depois da cedência da armadura e por esgotamento da capacidade resistente do tubo de GFRP.

Quadro 5.7 – Valores estimados pela análise numérica.

Casos	Carga aplicada (kN)	Deslocamento vertical (mm)
1ª fenda no betão	4,2	1,8
Cedência da armadura	10,2	11,8
Ruína da viga	11,7	18,2

Paralelamente, apresenta-se o comportamento previsto para o caso da viga de betão armado sem pré-esforço, até ao momento em que o programa não conseguiu obter convergência (problemas numéricos não resolvidos por motivos de falta de tempo útil para a conclusão deste trabalho). Nesse caso, a fendilhação iniciou-se para cerca de 1.3 KN de carga, valor acima do calculado pela análise simples.

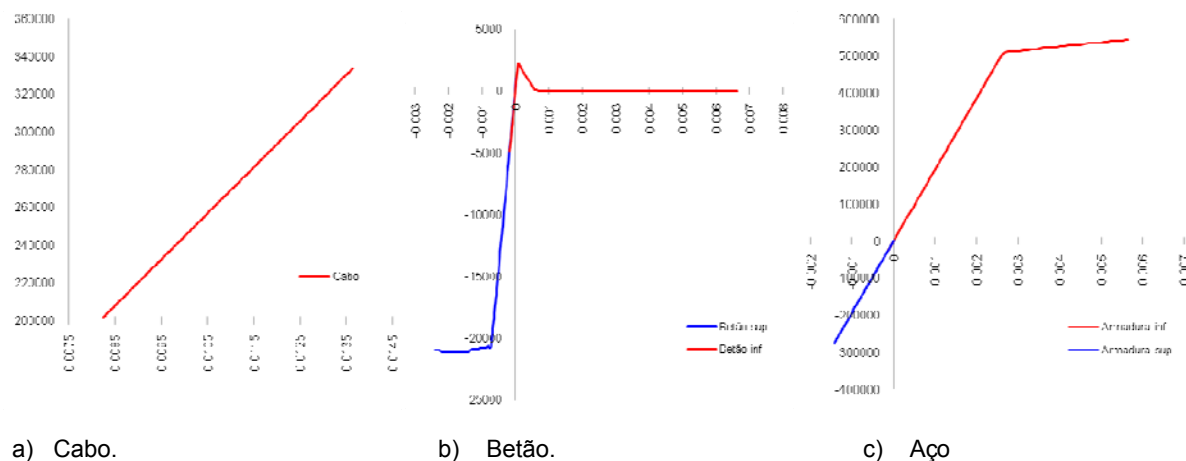


Figura 5.24 – Diagramas de evolução da “tensão normal vs extensão” nos materiais, na secção a meio vão e para as fibras mais comprimidas e mais traccionadas.

Para a secção transversal de meio vão, as Figuras 5.24 a), b) e c) ilustram as curvas de evolução da “tensão normal vs extensão”, como resposta do comportamento dos materiais do cabo de GFRP, das fibras mais comprimida e mais traccionada do betão, bem como, das armaduras ordinárias superior e inferior.

Da análise destas figuras conclui-se, em termos gerais, que o cabo de GFRP esgotou a sua capacidade resistente (caso a), a fibra mais comprimida do betão passou a estar plastificada (atingiu a capacidade resistente à compressão) para uma carga de 10,25kN (caso b) e a armadura inferior está em fase de cedência, embora aquém da sua capacidade última (caso c). Estes aspectos corroboram algumas das informações referidas, anteriormente, na análise da curva carga aplicada vs deslocamento vertical do modelo.

Atendendo a que em fase experimental se procurou perceber como seria a resposta da viga pré-esforçada na fase de descarga da solicitação, a Figura 5.25 expõe-se a comparação das curvas de “carga aplicada vs deslocamento vertical” de resposta dos modelos numérico e experimental correspondente a um ciclo de carga-descarga até 7,5kN.

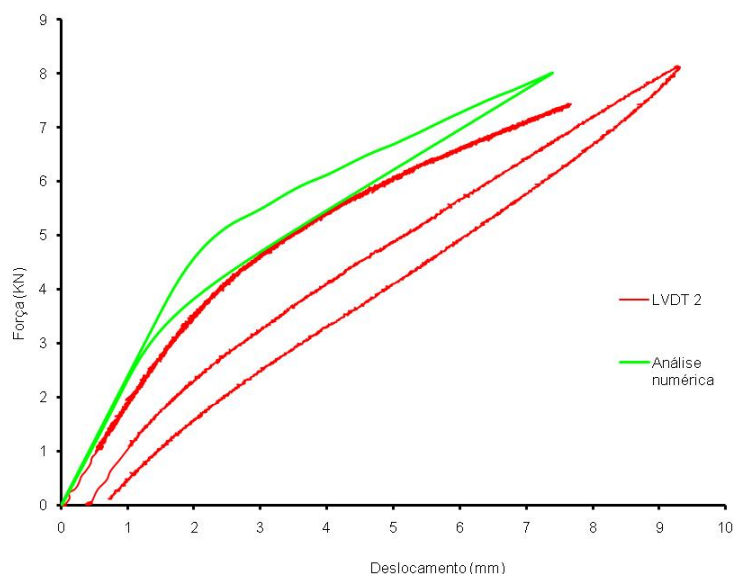


Figura 5.25 – Ciclo carga-descarga experimental vs numérico.

Constata-se que, na resposta numérica, a viga recuperou totalmente a posição inicial após descarga, ao contrário do sucedido experimentalmente e ilustrado na Figura 5.25. Embora com alguma diferença de rigidez da curva experimental para a teoria, na fase de carregamento as duas apresentam comportamentos semelhantes. Pelo contrário, na descarga, a partir do momento em que as fendas fecham (efeito de pré-esforço), a curva numérica de descarga passa a coincidir com a de carga, enquanto que na curva experimental nunca se chegam a sobrepor. Este facto vem admitir a hipótese de ter existido algum escorregamento do cabo, de forma discreta.

5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste capítulo evidenciam-se as fases que constituem a execução da técnica de pré-esforço de uma viga de betão armado, recorrendo a um processo alternativo de pré-tensão de um tubo de GFRP. De um modo geral, concluiu tratar-se de uma técnica simples que recorre a procedimentos e equipamentos rudimentares, fáceis de implementar em edificações com dificuldades técnica e económica para recorrerem ao pré-esforço clássico.

O programa experimental, estabelecido no trabalho, permitiu conhecer o comportamento de um modelo de viga pré-esforçado com GFRP, até uma carga aproximadamente igual ao dobro da carga de início de fendilhação do betão (P_{cr}) na ordem de 8kN.

O critério estabelecido no capítulo 4, relativo à definição do valor do pré-esforço imposto ao tubo de aproximadamente 60% da capacidade resistente do GFRP, proporcionou um adequado desempenho do modelo experimental. Este facto está perceptível no aumento da carga P_{cr} para o triplo do estimado para uma viga de betão armado equivalente, mas sem pré-esforço.

A análise do comportamento, quer na modalidade simples, quer no uso do programa EVOLUTION previram, com boa aproximação, o comportamento do modelo experimental na fase de serviço, embora com ligeiro excesso. Esta ligeira diferença pode estar relacionada com alguma incerteza quanto ao valor do pré-esforço instalado e à avaliação correcta das propriedades mecânicas dos materiais.

A análise pelo programa EVOLUTION demonstrou tratar-se de um modelo numérico completo e adequado para a previsão do comportamento de vigas de betão armado pré-esforçado com GFRP. Este permitiu o traçado de diagramas do tipo carga aplicada vs deslocamento vertical, tensão normal vs extensão do betão nas fibras mais comprimida e mais traccionada, tensão normal vs extensão das armaduras ordinárias de aço superior e inferior, tensão normal vs extensão do cabo de GFRP ao longo do carregamento do modelo até à ruína. No caso concreto do exemplo estudado, o programa estimou os valores da carga P_{cr} , carga de início de cedência da armadura, carga de início de esmagamento do betão e carga e modo de ruína do modelo avaliado.

6

CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

O trabalho agora concluído constitui mais uma contribuição na área da concepção de estruturas de betão armado com aplicação de um novo sistema de pré-esforço, recorrendo a um cabo constituído por material compósito de GFRP (plástico reforçado com fibras uniaxiais de vidro) previamente tensionado.

No geral, considera-se que os principais objectivos estabelecidos na dissertação foram positivamente alcançados. As principais conclusões, extraídas deste trabalho de investigação, foram sendo referidas nos capítulos anteriores, pelo que, neste capítulo se fará referência às conclusões que se julgam mais importantes.

O esforço em concretizar a ideia da concepção de um sistema novo de varão pré-tensionado, constituído por 2 componentes que se encontram em auto-equilíbrio (um traccionado e o outro comprimido) tornou-se uma realidade. Este sistema tem a vantagem de poder ser executado em pré-fabricação. Para efeitos de experimentação em laboratório, este sistema admite a concepção de um mecanismo de implementação de pré-tensão por aperto de parafusos que impõem a compatibilidade de deformações entre a parte traccionada e a parte comprimida. Face a uma análise geral das várias hipóteses de selecção dos materiais, a combinação dos materiais FRP vs aço constatou-se ser a mais adequada para a concretização do varão misto.

Seleccionado um fabricante para o fornecimento dos tubos de GFRP, constatou-se que as discrepâncias das propriedades mecânicas obtidas a partir do ensaio de tracção no LABEST vs as fornecidas pela Fibrolux, sugerem que os produtos disponíveis para estes trabalho apresentam cerca de 1/3 da capacidade estimada inicialmente pelo fornecedor. Os novos valores experimentais foram assumidos ao longo de todo o estudo efectuado nesta dissertação.

O cabo de GFRP pré-tensionado executado em laboratório e mantido em observação (monitorizado) sobre tensão num sistema de apoio rígido permitiu concluir sobre a facilidade de aplicação do pré-esforço por combinação da acção integrada da cabeça de aperto com a cabeça de reacção das extremidades do cabo. O sistema registou inicialmente um pré-esforço na ordem de 70% da capacidade máxima do tubo de GFRP. No final dos 37 dias, constatou-se que o valor médio da carga registada no tubo é de 20,9kN (na ordem de 60% da capacidade última do GFRP) e que não ocorreu

relaxação neste período de tempo. Este facto reforçou a ideia de implementar este sistema de pré-tensão no pré-esforço de uma viga de betão armado.

A técnica de pré-esforço de uma viga de betão armado foi executada num modelo reduzido de 2.20m de comprimento, constatando tratar-se de um procedimento simples que recorre a equipamentos rudimentares, fáceis de implementar em edificações com dificuldades técnica e económica para lançarem mão do pré-esforço clássico.

O ensaio de flexão em 3 pontos realizado à viga pré-esforçada com o cabo de GFRP permitiu conhecer o comportamento do modelo até uma carga aproximadamente igual ao dobro da carga de início de fendilhação do betão (P_{cr}), na ordem de 8kN.

O critério estabelecido no capítulo 4, relativo à definição do valor do pré-esforço imposto ao tubo de aproximadamente 60% da capacidade resistente do GFRP, proporcionou um adequado desempenho do modelo experimental. Este facto está perceptível no aumento da carga P_{cr} para o triplo do estimado para uma viga de betão armado equivalente, mas sem pré-esforço.

A análise do comportamento, quer na modalidade simples, quer no uso do programa EVOLUTION previram com boa aproximação ao comportamento do modelo experimental na fase de serviço, embora com ligeiro excesso. Esta ligeira diferença pode estar relacionada com alguma incerteza quanto ao valor do pré-esforço instalado e à avaliação correcta das propriedades mecânicas dos materiais.

A análise, pelo programa EVOLUTION, demonstrou tratar-se de um modelo numérico completo e adequado para a previsão do comportamento de vigas de betão armado pré-esforçado com GFRP. Este permitiu o traçado de diagramas do tipo carga aplicada vs deslocamento vertical, tensão normal vs extensão do betão nas fibras mais comprimida e mais traccionada, tensão normal vs extensão das armaduras ordinárias de aço superior e inferior, tensão normal vs extensão do cabo de GFRP ao longo do carregamento do modelo até à ruína. No caso concreto do exemplo estudado, o programa estimou os valores da carga P_{cr} , da carga de início de cedência da armadura, da carga de início de esmagamento do betão e da carga e do modo de ruína do modelo testado.

6.2 FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Alcançada a maioria dos objectivos estabelecidos na presente dissertação, centrados na concretização do desenvolvimento de uma técnica de pré-esforço de elementos de betão armado por via da pré-tensão de um tubo de GFRP, existem, ainda, alguns aspectos deste trabalho que merecem ser mais aprofundados e outros explorados, devendo ser considerados em futuros desenvolvimentos, nomeadamente:

- A execução de novos cabos pré-tensionados, novas vigas de betão pré-esforçadas e novos ensaios nas condições definidas na presente dissertação, de modo a obter-se suficiente confiança face ao carácter exploratório, inovador e limitado no tempo que envolveu as condições de trabalho desta investigação até à conclusão da tese;
- A pesquisa e estudo de outros materiais alternativos para a concepção do tubo misto pré-tensionado (parte traccionada e parte comprimida) de modo a melhorar a razão capacidade resistente vs custo, designadamente, potenciar o uso do aço, dos compósitos de CFRP (fibras de carbono), de AFRP (fibras de aramida), outros tipos de GFRP (fibras de vidro) entre outros materiais;

- O desenvolvimento de novas formas de mecanismo de fixação das extremidades (cabeças de transferência de esforços) através da exploração de novas colas ou novos métodos de fixação das extremidades do cabo;
- O melhoramento do critério de rugosidade superficial do tubo de pré-tensão com vista a aumentar a aderência betão-cabo;
- O reaproveitamento do varão de aço usado na aplicação da pré-tensão ao tubo exterior, potenciando-o como armadura extra na viga de betão em paralelo com o tubo externo, através da implementação de algum mecanismo adicional de pós-tensão em obra;
- O potenciar a execução em pré-fabricação desta nova técnica, caso o sistema apresente viabilidade significativa na indústria da construção civil.
- O estabelecimento de critérios de dimensionamento e de procedimentos de construção em concordância com os regulamentos específicos dos materiais e as normas de segurança da construção.

7

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

- ACI 440.1R-06. (2006). *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*. Farmington Hills, Michigan.
- ACI 440.3R-04. (2004). *Guide Test Methods for Fiber Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*. ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- ALTO (2010): <http://www.alto.com.pt/>, Porto, Portugal.
- ASTM D 3916. (2002). *Standard Test Method for Tensile Properties of Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Plastic Rod*. ASTM standards, American Society for Testing and Materials (ASTM), USA.
- ASTM D 638. (2003). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. ASTM standards, American Society for Testing and Materials (ASTM), USA.
- CEB-FIP (1993). *Model Code 1990 – Design Code*. Comité Euro-International du Béton. Thomas Telford Services Ltd, London, 437 pp.
- EC 2 (2004). *EUROCODIGO 2 - Projecto de estruturas de betão- Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. CEN - Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.
- EN 13706-2. (2002). *Reinforced plastics composites – Specifications for pultruded profiles - Part 2: Methods of test and general requirements*. European Standard, CEN, Brussels.
- EN ISO 527-5. (1997). *Plastics - Determination of tensile properties - Test conditions for unidirectional fibre reinforced plastic composites*. International Standard, International Organization for Standardization (ISO).
- Ferraz, L.F.P. (2010). *Modelo para Avaliação do Comportamento Estrutural de Obras de Arte*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, DECivil, Porto.
- Fib (2007). *FIB Bulletin 40 - FRP Reinforcement in RC Structures*. Technical report, Federation Internationale du Béton, Task Group 9.3, Lausanne, Suíça (versão provisória).
- FIBROLUX (2010): <http://fibrolux.com/>, Alemanha.

FIBROLUX GmbH (2010). *GRP – Profiles and gratings*. Fibrolux, Fichas técnicas, Hofheim, Alemanha.

Figuerias, J.A. (1993). *Dimensionamento de Estruturas de Betão Pré-Esforçado*, Acção de formação complementar para Engenheiros Cíveis promovidos pelo Instituto da Construção, FEUP, Porto.

Juvandes, L.F.P. (1999). *Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, DECivil, Porto.

Leonhardt, F. (1979). *Construções de concreto*, Editora Interciência, Rio de Janeiro, Brasil.

MBRACE (2006). *Fichas técnica – Sistema MBRACE Bettor-MBT*, Bettor MBT Portugal, SA.

NP-ENV 206, (1993), *Betão – Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade*, Norma Portuguesa, IPQ, Outubro.

PRINCE FIBRE TECH BV (2010): <http://www.princefibretch.com/>, Holanda

Reis, V.L.F. (2009). *Construção de Estruturas de Betão Armado com Varões de FRP*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil - Ramo de Especialização de Materiais e Processos de Construção, FEUP, Porto.

SIKA (2002). *Prontuário de fichas técnicas – Construir com segurança*, Sika, Indústria Química S.A., edição nº5.

ANEXO

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste anexo, reúnem-se as Fichas Técnicas disponíveis para os materiais usados no âmbito do presente trabalho. Incluem-se as informações sobre o aço de pré-esforço, os tubos de GFRP, as colas usadas nas ancoragens do cabo de pré-esforço e a caracterização do betão confeccionado na betonagem da viga pré-esforçada.

SOCITREL, S.A. – VARÃO DE PRÉ-ESFORÇO

FICHA TÉCNICA

2010



SOCITREL

PSG-019/2008
E452:2006

FIO DE AÇO PARA PRÉ-ESFORÇO – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS (de acordo com Especificação LNEC E452:2006)

Diâmetro Nominal (mm)	$R_m^{(1)}$ (MPa)	$S_0^{(2)}$ (mm ²)	Massa (g/m)	$F_m^{(3)}$ (kN)	$F_{p0.1}^{(3)}$ (kN)	$A_{gt}^{(4)}$ (%)	E (GPa)
4	1770	12,57	98,2	22,3	19,6	3,5	205±10
4	1860	12,57	98,2	23,4	20,8		
5	1770	19,63	153,3	34,8	30,5		
5	1860	19,63	153,3	36,5	32,5		
6	1770	28,27	220,8	50,0	44,1		
7	1670	38,48	300,5	64,3	56,6		

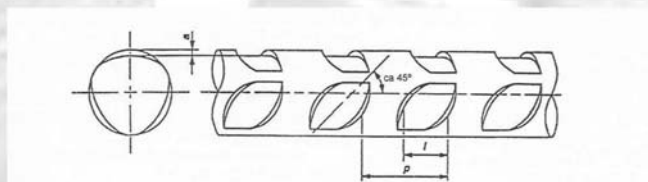
(1) Valor nominal

(2) Desvio admissível de $\pm 2\%$

(3) Valor característico mínimo referente ao quantilho de 95 %

(4) Valor mínimo

Geometria das marcas e indentações



Diâmetro nominal (mm)	Profundidade (mm), a		Comprimento (mm), l	Passo (mm), p
	Marcado	Indentado		
4,0 e 5,0	$0,06 \pm 0,03$	$0,13 \pm 0,03$	$3,5 \pm 0,5$	$5,5 \pm 0,5$
6,0 e 7,0	$0,09 \pm 0,04$	$0,16 \pm 0,04$	$5,0 \pm 0,5$	$8,0 \pm 0,5$

Existem normas internacionais segundo as quais estes fios podem ser produzidos sob consulta, tais como:

- UNE 36094 Alambres y cordones de acero para armaduras de hormigón pretensado
- prEN 10138 Prestressing Steels Part 1: General requirements + Part 2 Wire
- BS 5896 Specification for High Tensile Steel Wire and Strand for the Prestressing of Concrete
- ASTM A 421 Standard specification for Uncoated Stress-Relieved Steel Wire for Prestressed Concrete
- ASTM A 648 Standard specification for Steel Wire, Hard Drawn, for Prestressing Concrete Pipe
- ASTM A 821 Standard specification for Steel Wire, Hard Drawn, for Prestressing Concrete Tanks
- ASTM A 881 Standard specification for Steel Wire, Deformed, Stress-Relieved or Low-Relaxation for Prestressed Concrete Railroad Ties
- NBR 7482: 2008 Fios de aço para estruturas de concreto protendido, especificação

FIBROLUX GMBH – TUBOS DE GFRP

FICHAS TÉCNICAS

2010

Fibrolux

GFK-PROFILE UND GITTERROSTE GRP-PROFILES AND GRATINGS

PROFILES ET CAILLEBOTIS EN PRV □ PERFILES Y REJILLAS EN PRFV □ PROFILE I KRATY Z TWS □ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫЕ ПРОФИЛИ И РЕШЕТКИ □ GFK-PROFILY A MRÍŽOVÉ ROŠTY □ PERFIS E GRADIL EM PRFV □ GRP ПРОФИЛИ И ПОДОВИ РЕШЕТКИ □ GLASVEZEL VERSTERKTE PROFIJEN EN ROOSTERS □ GLASSFIBERARMERT KUNSTOFF PROFILER OG GITTERRISTER □ STAKLOPLASTICNE PROFILE I GAZISTA □ PROFILI E GRIGLIATI IN PRFV □ GRP PROFILIT JA RISTIKOT □ GRP PROFILAR OCH GALLER □ REHAS AT MGA HUGIS NA YARI SA GRP □ GRP PROFILER OG GITTERRISTER □ UVEGSZALLAL EROSITETT MUANYAG PROFILOK ÉS RACSOK □ STIKLO PLUOŠTO GROTELES IR PROFILIAI □ PROFILES ET CAILLEBOTIS EN PRV □ PERFILES Y REJILLAS EN PRFV □ PROFILE I KRATY Z TWS □ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫЕ ПРОФИЛИ И РЕШЕТКИ □ GFK-PROFILY A MRÍŽOVÉ ROŠTY □ PERFIS E GRADIL EM PRFV □ GRP ПРОФИЛИ И ПОДОВИ РЕШЕТКИ □ GLASVEZEL VERSTERKTE PROFIJEN EN ROOSTERS □ GLASSFIBERARMERT KUNSTOFF PROFILER OG GITTERRISTER □ STAKLOPLASTICNE PROFILE I GAZISTA □ PROFILI E GRIGLIATI IN PRFV □ GRP PROFILIT JA RISTIKOT □ GRP PROFILAR OCH GALLER □ REHAS AT MGA HUGIS NA YARI SA GRP □ GRP PROFILER OG GITTERRISTER □ UVEGSZALLAL EROSITETT MUANYAG PROFILOK ÉS RACSOK □ STIKLO PLUOŠTO GROTELES IR PROFILIAI



Fibrolux
Verstärkte Kunststoffe

Sara Martins
Plásticos Reforçados

Fibrolux GmbH
c/ Hessenstr. 18
65719 Hofheim
Alemanha

Telefone: +49 6122 9100 358
Fax: +49 6122 150 01
Telemóvel: +351 969 285 850
Email: martins@fibrolux.com
www.fibrolux.com

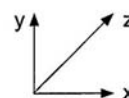
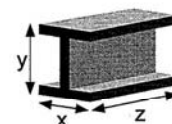


Normas

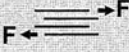
DIN 13706

ISO 13706

		TYP MR		TYP UD
		Z	X	Z
		250 MPa	20 - 60 MPa	900 MPa
		250 MPa	20 - 60 MPa	900 MPa
		25.000 MPa	9.000 MPa	40.000 MPa
		1,0 - 1,8 %		2 %
		150 - 300 MPa	30 - 60 MPa	450 MPa
		10.000 MPa	4.000 MPa	30.000 MPa
		2,0 kg / dm ³		2,1 kg / dm ³
		90 - 120 KJ / m ²		120 KJ / m ²
		> 40 barcol		> 50 barcol



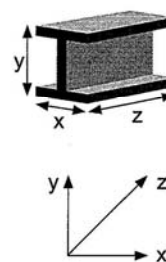
7

	70 MPa
	5 - 10 kV/mm
CTI	KC 600
	$12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
	-100°C → +155°C (180 °C)
	< 0,15%

www 1300



Typ MR	Z	X	Z	X
	135 MPa	20 MPa	70 MPa	15 MPa
	135 MPa	20 MPa	70 MPa	15 MPa
	135 MPa	25 MPa	70 MPa	20 MPa
	17 MPa		8 MPa	



8

www 1400



60-80 m/min



100-400 m/min



1 800-3 600 m/min



100-400 m/min



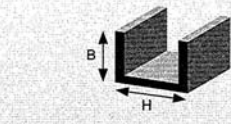
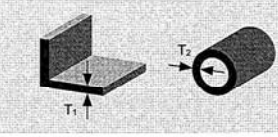
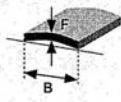
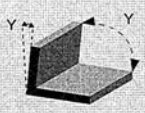
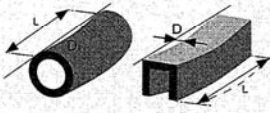
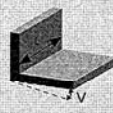
± 10 mm

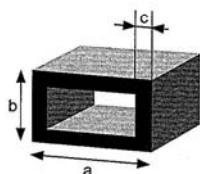


1500  www

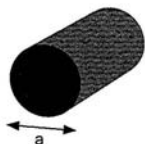
	ISO		VE D411	
	20° C	50° C	20° C	50° C
AgNO ₃	•	•	•	•
AlCl ₃	•	•	•	•
Al(NO ₃) ₃	•	•	•	•
Al ₂ (SO ₄) ₃	•	•	•	•
BaCl ₂	•	•	•	•
BaCO ₃	•	•	•	•
Ba(OH) ₂	•	•	•	•
Ba(NO ₃) ₂	•	•	•	•
BaS	•	•	•	•
BaSO ₄	•	•	•	•
CaCl ₂	•	•	•	•
Ca(ClO) ₂ , 15%	•	•	•	•
Ca(OH) ₂ , 20%	•	•	•	•
Ca(NO ₃) ₂	•	•	•	•
CCl ₄ , 100%	•	•	•	•
CH ₃ -COOH, 5%	•	•	•	•
CH ₃ -COOH, 50%	•	•	•	•
CH ₃ -COOH, 75%	•	•	•	•
C ₂ H ₆ O MEK	•	•	•	•
CHOOH, 10%	•	•	•	•
C ₂ H ₅ OH, 10%	•	•	•	•
CH ₃ OH, 100%	•	•	•	•
CO ₂	•	•	•	•
CuCl, CuCl ₂	•	•	•	•
CuSO ₄	•	•	•	•
CS ₂ , 100%	•	•	•	•
FeCl ₂	•	•	•	•
Fe(NO ₃) ₃	•	•	•	•
FeSO ₄	•	•	•	•
HBr, 10%	•	•	•	•
HCN, 10%	•	•	•	•
HCl, 5%	•	•	•	•
HCl 20%	•	•	•	•
H ₂ CrO ₄ , 5%	•	•	•	•
H ₂ CrO ₄ , 10%	•	•	•	•
HNO ₃ , 5%	•	•	•	•
H ₂ O ₂ , 3%	•	•	•	•
H ₂ O+Cl ₂	•	•	•	•
H ₃ PO ₄ , 10%	•	•	•	•
H ₂ SO ₄ , 10%	•	•	•	•
H ₂ SO ₄ , 30%	•	•	•	•

	ISO		VE D411	
	20° C	50° C	20° C	50° C
KCl	•	•	•	•
KOH, 5%	•	•	•	•
KOH, 10%	•	•	•	•
KOH, 25%	•	•	•	•
KOH, 50%	•	•	•	•
K ₂ CO ₃ , 10%	•	•	•	•
KNO ₃	•	•	•	•
KMnO ₄	•	•	•	•
K ₂ SO ₄	•	•	•	•
MgCl ₂	•	•	•	•
MgCO ₃	•	•	•	•
Mg(NO ₃) ₂	•	•	•	•
MgSO ₄	•	•	•	•
NaBr	•	•	•	•
NaCl	•	•	•	•
NaCN	•	•	•	•
Na ₂ CO ₃ , 10%	•	•	•	•
NaHCO ₃ , 10%	•	•	•	•
NaHSO ₃	•	•	•	•
NaNO ₃	•	•	•	•
NaNO ₂	•	•	•	•
NaOH, 5%	•	•	•	•
NaOH, 10%	•	•	•	•
NaOH, 25%	•	•	•	•
NaOCl, 20%	•	•	•	•
Na ₂ SO ₄	•	•	•	•
Na ₂ SO ₃	•	•	•	•
Na ₂ S ₂ O ₃	•	•	•	•
NH ₃ , 1%	•	•	•	•
NH ₄ Br	•	•	•	•
NH ₄ Cl	•	•	•	•
NH ₄ F	•	•	•	•
(NH ₄) ₂ CO ₃	•	•	•	•
NH ₄ NO ₃	•	•	•	•
(NH ₄) ₃ PO ₄	•	•	•	•
(NH ₄) ₂ SO ₄	•	•	•	•
NiCl ₂	•	•	•	•
Ni(NO ₃) ₂	•	•	•	•
NiSO ₄	•	•	•	•
ZnCl ₂	•	•	•	•
ZnSO ₄	•	•	•	•

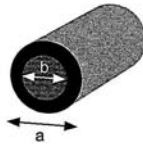
	B, H (mm)	ΔH	ΔB
	0 - 50	$\pm 0,20$	$\pm 0,20$
	50 - 100	$\pm 0,30$	$\pm 0,30$
	100 - 300	$\pm 0,35$	$\pm 0,35$
	300 -	$\pm 0,40$	$\pm 0,40$
	D, d (mm)	ΔD	Δd
	0 - 10	$\pm 0,20$	$\pm 0,20$
	10 - 20	$\pm 0,30$	$\pm 0,30$
	20 - 50	$\pm 0,35$	$\pm 0,35$
	50 - 100	$\pm 0,40$	$\pm 0,40$
	100 -	$\pm 0,45$	$\pm 0,45$
	T ₁ , T ₂ (mm)	ΔT_1	ΔT_2
	0 - 2	$\pm 0,15$	$\pm 0,30$
	2 - 5	$\pm 0,20$	$\pm 0,35$
	5 - 10	$\pm 0,35$	$\pm 0,45$
	10 -	$\pm 0,45$	$\pm 0,50$
	$F < 0,008 \times B \text{ mm}$		
	$Y \pm 1,5^\circ$		
	$\leq 2 \text{ mm / m}$		
	$\leq 1^\circ / \text{m}$		
	$L \pm 20 / - 0 \text{ mm}$		
	$V \pm 1,5^\circ$		



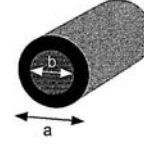
mm		
a	b	c
75	75	6
75	75	9
80	33	3
80	40	3
83	28	3
98	25	3
98	25	3,5
100	40	3
100	70	5 x 7
100	100	5
100	100	8
107	18	3
114	114	6
114	114	8
114	114	10
120	60	5
125	125	6
130	130	6
130	130	7
130	130	9
150	50	3
160	70	3,5
160	70	5 x 8
200	100	8
500	200	12



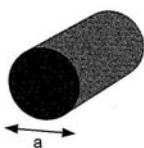
mm
a
3
3,6
4
5
6
6,35
7
8
9
10
11,7
12
12,7
13
14
15
16
17,8
18
20
22
24
25
28
27
28
30
32
35
36
38
40
44
48
50
55
80



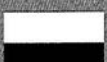
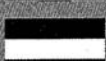
mm	
a	b
6	3
8	4
8	5
8	6
9	6
9,9	8,2
10	5
10	6
10	7
11	7
12	6
12	8
12	10
13	8
13	8,5
14	5,6
14	8
14	12
16	5
16	10
16	10,2
16	12
16	13
16	12,5
17,8	12,5
18	12,7
18	12,8
19,9	13,9
20	10,5
20	14
20	15
20	15,5
20	16,1
20	17
22	15
22	16,5
22	17
25	20
26	16
27	21
28	9



mm	
a	b
28	21
28	22
28	23
29,3	23,5
30	20
30	24
30	25
30	26
32	26
32	27
35	29
37	26
37	28
38	27
38	33
40	32
43	37
48	38
48	42
50	34
50	38
50	41
50	42
60	53
65	55
70	62
75	65
76	65
80	50
90	75
90	76
90	78
110	100
114	105
120	110
169	149
170	150



mm
a
1,2
1,4
1,8
2
2,2
2,6
2,7

	info@fibrolux.com +49 6122 9100 300		danmark@fibrolux.com +49 6122 9100 302
	info@fibrolux.com +49 6122 9100 300		belgique@fibrolux.com +49 6122 9100 321
	info@fibrolux.com +49 6122 9100 300		espana@fibrolux.com +49 6122 9100 354
	unitedkingdom@fibrolux.com +49 6122 9100 305		bulgaria@fibrolux.com +49 6122 9100 303
	usa@fibrolux.com +49 6122 9100 305		cechy@fibrolux.com +49 6122 9100 404
	australia@fibrolux.com +49 6122 9100 305		magyar@fibrolux.com +49 6122 9100 308
	france@fibrolux.com +49 6122 9100 321		polska@fibrolux.com +49 6122 9100 403
	italia@fibrolux.com +49 6122 9100 331		rossia@fibrolux.com +49 6122 9100 405
	nederland@fibrolux.com +49 6122 9100 301		portugal@fibrolux.com +49 6122 9100 358
	norge@fibrolux.com +49 6122 9100 302		pilipinas@fibrolux.com +49 6122 9100 401



Fibrolux GmbH • Hessenstr. 18 • D-65719 Hofheim • Germany
Tel: +49 6122 9100 0 • Fax: +49 6122 15001 • info@fibrolux.com • www.fibrolux.com

PRINCE FIBRE TECH BV – TUBOS DE GFRP

FICHAS TÉCNICAS

2009

 PRINCE FIBRE TECH BV STRONG FIBER PROFILES								
HIGH PERFORMANCE TUBES								
D	d	wall thickness	Area	RESIN →	E-GLASS	S2 GLASS	CARBON	
				Inertia	weight	weight	weight	
[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[mm ⁴]	[g/m]	[g/m]	[g/m]	
3	1.5	0.75	5.3	3.7	9.8	9.3	8.2	
4	1.7	1.15	10.3	12.2	17.4	16.5	14.6	
4	2	1.00	9.4	11.8	17.4	16.5	14.0	
4	2.5	0.75	7.7	10.6	18.0	15.2	11.0	
4.5	3	0.75	8.8	18.2	16.0	15.2	13.0	
4.8	3	0.80	11.0	22.1	20.0	19.0	17.0	
5	3.5	0.75	10.0	23.3	18.0	17.1	15.0	
5	3	1.00	12.6	26.7	23.3	22.1	19.4	
5.5	3.5	1.00	14.1	37.6	26.2	24.8	21.0	
5.5	4	0.75	11.2	32.4	21.0	20.0	17.0	
6	3.5	1.25	18.6	56.3	34.5	32.8	28.9	
6	3.6	1.20	18.1	55.4	33.5	31.8	28.0	
6	4	1.00	15.7	51.1	29.1	27.6	24.4	
6	4.7	0.65	10.9	39.7	20.0	19.0	16.0	
6	4.9	0.55	9.4	35.3	17.0	16.2	14.0	
6.6	4	1.30	21.6	80.6	40.0	38.0	33.0	
7	4.8	1.10	20.4	91.8	38.0	36.1	31.0	
7	5	1.00	18.8	87.2	34.0	32.3	29.0	
8	4	2.00	37.7	188.5	70.0	66.5	58.0	
8	5	1.50	30.8	170.4	56.7	53.8	47.5	
8	6	1.00	22.0	137.4	40.7	38.6	34.1	
8	6.5	0.75	17.1	113.4	31.0	29.5	26.0	
8	6.7	0.65	15.0	102.1	27.0	25.7	23.0	
9	7	1.00	25.1	204.2	46.5	44.2	38.3	
9	8	0.50	13.3	121.0	24.0	22.8	20.0	
10	5	2.50	58.9	460.2	109.0	103.6	91.0	
10	6	2.00	50.2	427.3	93.0	88.3	77.9	
10	7	1.50	40.04	373.0	74.1	70.4	62.0	
10	7.3	1.35	36.67	351.5	68.0	64.6	57.0	
10	7.5	1.25	34.34	335.6	63.0	59.9	53.0	
10	8	1.00	28.26	288.8	52.3	49.7	43.8	
11	7	2.00	56.52	600.8	104.6	99.4	87.7	
11	8	1.50	44.75	517.6	82.8	78.7	69.4	
12	7.8	2.10	65.28	836.2	121.0	115.0	101.0	
12	8	2.00	62.80	816.8	116.2	110.4	97.4	
index: 1 = Vinylester 2 = Epoxy 3 = Phenol								
www.PRINCFIBRETECH.com PRINCE FIBRE TECH B.V. De Vocht 44 8253 PH Dronk The Netherlands Phone: +31(0)321 316425 / Fax: +31(0) 321 317576 Mail adress: info@princefibretech.com								

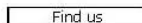
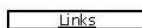
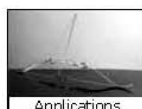
PRINCE FIBRE TECH BV

STRONG FIBER PROFILES

HIGH PERFORMANCE TUBES							
D	d	wall thickness	Area	RESIN →			
				Inertia	E-GLASS 1/2/3 weight	S2 GLASS 1/2/3 weight	CARBON 1/2/3 weight
[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[mm ⁴]	[g/m]	[g/m]	[g/m]
12	8,5	1,75	56,3	762	104	98,8	87,0
12	9	1,50	49,5	696	92	86,9	76,7
12	10,2	0,90	31,4	487	62	58,9	52,0
13	9	2,00	89,1	1080	128	121,5	107,0
13	10	1,50	54,2	911	100	85,0	84,0
13	11	1,00	37,7	683	70	66,5	58,0
14	11	1,50	58,9	1167	109	103,6	91,0
14	10	2,00	75,4	1385	140	132,5	116,9
14	12,2	0,90	37,0	788	68	64,6	57,0
15,8	13	1,40	63,3	1657	117	111,3	98,0
16	12	2,00	87,9	2199	163	154,6	136,3
16	13	1,50	68,3	1815	126	120,1	105,9
16	14,2	0,90	42,7	1221	79	75,1	66,0
20	16	2,00	113,0	4637	209	198,8	175,3
20	17	1,60	87,1	3754	161	153,0	135,0
22	16	3,00	179,0	8282	331	314,7	277,6
22	18	2,00	125,6	6346	232	220,4	194,0
22	19	1,60	96,6	5102	178	169,1	149,7
23,5	20	1,75	119,5	7117	221	210,0	185,3
25	20	2,50	176,8	11321	327	310,7	274,0
25	22	1,50	110,7	7676	205	194,6	171,6
25	21	2,00	144,4	9528	267	253,7	224,0
25	23	1,00	75,4	5438	140	133,0	117,0
29	26,5	1,25	108,9	10511	201	191,0	169,0
30	27	1,60	134,2	13674	248	235,6	208,2
30,5	28	1,25	114,8	12307	212	201,4	178,0
38	34	2,00	226,1	36757	418	397,1	350,6
50	46	2,00	301,44	87010	557	529,2	467,0
60	56,5	1,75	320,08	135949	592	562,4	506,0
80	76	2,00	489,84	372957	907	861,7	759,0

Index: 1 = Vinyl Ester 2 = Epoxy 3 = Polyester

www.PRINCFIBRETECH.com
 PRINCE FIBRE TECH B.V.
 De Vecht 44
 6253 PH Grooten
 The Netherlands
 Phone: +31(0)321 316425 / Fax: +31(0) 321 317576
 Mail address: info@princefibretech.com



Properties

Properties

A composite is a combination of reinforcements (fibre) and a matrix (resin). The function of the matrix is to bond the fibres together. For the mechanical properties of our products we look at the fibres, because they give the mechanical properties of the profile. Because the different directions of the fibres, the properties are also different.

Heat resistance of the matrix is a very important item in the fibre reinforced industry.

Because of its effect on the mechanical properties of the composite.

The resin matrixes we use are:

Polyurethane	190 C	heat distorsion temp
Epoxy, Prince A	170 C	heat distorsion temp
Epoxy, Prince B	100 C	heat distorsion temp
Vinyl-ester - epoxy hybrid	105 C	heat distorsion temp
Poy-ester	100 C	heat distorsion temp

The fibre volume in our products is to suit customer requirements within limitations of price and volume

* The values given below are component values.

Laminate properties (fibre direction)

	Vf	Vf	Density	Tensile strength	Compression strength	tensile modulus	therminal coefficient of expansion
	%	%	kg/dm3	Mpa	Mpa	Gpa	/°10^-6 C
E-glasfibre/Ecopy	31	50	1,48	700	500	26	9,02
	47	66	1,73	1000	550	38	7,15
	72	85	2,12	1450	650	56	5,77
Carbonfibre/ Epoxy Tenax STS	39	50	1,31	1250	1050	96	0,76
	55	66	1,43	1750	1450	134	0,24
	78	85	1,62	2450	2050	188	-0,15
Carbonfibre/ Epoxy Tenax - J UTS 5131	39	50	1,31	1600	1050	96	0,76
	55	66	1,44	2200	1450	134	0,24
	78	85	1,62	3100	2050	188	-0,15
Carbonfibre/ Epoxy Tenax - J IIMS 5131	39	50	1,31	1800	1150	116	0,56
	55	66	1,44	2500	1600	161	0,13
	78	85	1,62	3550	2250	227	-0,19

Given values are indicative only.

Surface

By braiding our profiles we can create a very smooth surface.

Our glassfibre products can be produced in almost any RAL colour, on request.

On several profiles we can create a high glass surface finish.

Lenghts

Pull braiding is a 'continuous proces' (which means that all lenghts are available).

Phone (+31)(0)321-316425 - Fax (+31)(0)321-317576 - info@princefibretech.com
Prince Fibre Tech BV - De Vecht 44 - 8253 PH Dronten - The Netherlands

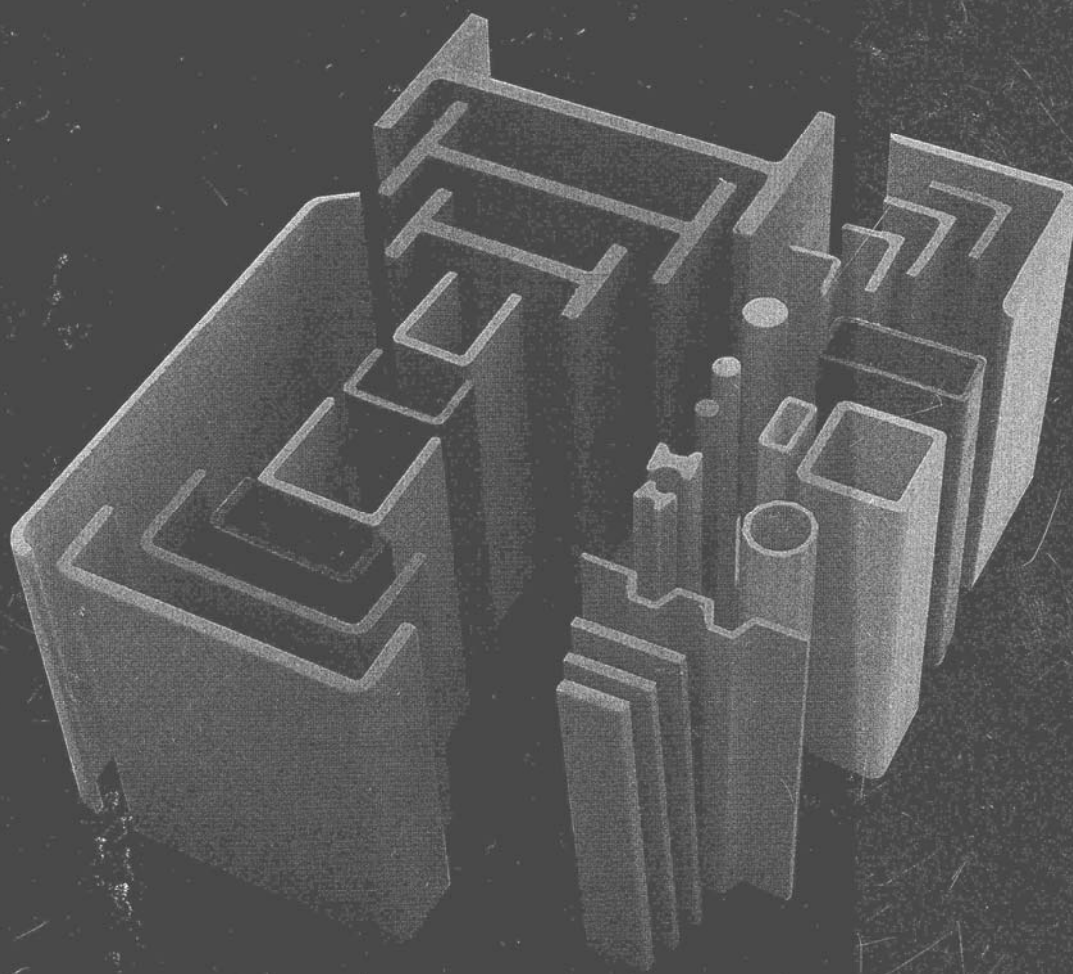
- Copyright all rights reserved © 2005 princefibretech.com -
 Designed by **Emas**

ALTO PERFIS PULTRUDIDOS – TUBOS DE GFRP

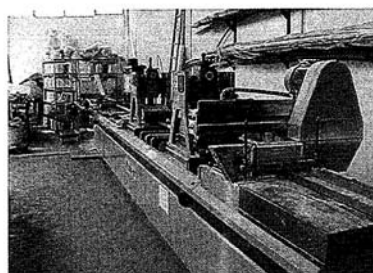
FICHAS TÉCNICAS

2000

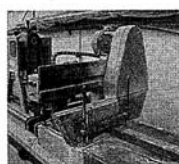
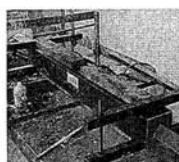
LTO



Perfis Pultrudidos, Lda.



**Processo
de pultrusão**



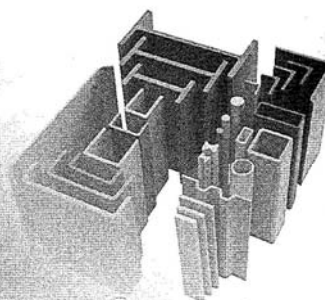
Pultrusão

Os perfis pultrudidos são produtos de alta performance, fabricados num processo contínuo de produção chamado pultrusão. A pultrusão é um processo de fabrico contínuo de perfis em plástico reforçado com fibra. Envolve a incorporação de fibras, tais como fibra de vidro, de carbono ou de aramida (Kevlar®), numa gama de resinas de alta performance, sendo a de poliéster de uso geral, mas consoante a aplicação podem ser utilizadas resinas de viniléster, acrílicas ou epóxi. Neste processo, as fibras são arrastadas através de um banho de resina e guiadas até uma fiação aquecida. Esta tem a geometria do perfil a produzir. A polimerização do composto fibra/resina ocorre dentro da fiação. Um sistema de tracção puxa o perfil até à serra para cortar o perfil com o comprimento desejado. O conteúdo de fibra pode variar entre 40 e 80%, conforme a aplicabilidade do perfil. Engenheiros, Arquitectos e Designers estão constantemente a procurar modos para melhorar os seus produtos. A selecção do material é a parte crítica deste processo. Os compostos pultrudidos possuem múltiplas vantagens sobre a maioria dos materiais tradicionais, tais como o aço e o alumínio e têm cada vez maior procura.

Propriedades

Material	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Peso (g/cm ³)
Aço	300-500	210	7,8
Alumínio	250	70	2,7
PVC	50-100	0,5-3	1,05
Pultrudido	150-1000	14-40	1,6-2,1

As propriedades dos Perfis Pultrudidos variam com a percentagem de fibra incorporada





LISTA DE PERFIS

Fevereiro 2000

 PERFIL EM U U-profile		
axbxe (mm)	Área (cm ²)	Peso (g/m)
40x50x5	6.43	1160
50x30x4	4.01	716
60x55x5	7.88	1402
72x30x3x5		900
83x30x3.5x5		840
110x50x6		1700
150x40x6		
200x60x10		5550

 VARÃO Rod		
d (mm)	Área (cm ²)	Peso (g/m)
10	0.79	158
14	1.54	310
15	1.78	313
19	2.84	503
20	3.14	632

 BARRA Bar		
axe (mm)	Área (cm ²)	Peso (g/m)
20x5	1	201
30x5	1.5	302
30x6	1.8	362
35x3	1.05	211
40x5	2	403
50x5	2.5	503
80x5	4	805

O peso indicado é pode ter uma variação de 10%.

Os preços dos perfis acima designados são referentes à formulação standard desta empresa (resina poliéster isofáltica, cor branca e protecção U.V.) e para quantidades mínimas de produção de 1000 metros.

Centro de Empresas Net
Rua de Salazares, 842
4100 Porto
Telef. 6170579 / 6179854 • Fax. 6177662

 PERFIL EM L (cantoneira) L-profile		
axbxe (mm)	Área (cm ²)	Peso (g/m)
35x35x5	3.21	573
40x30x5	3.21	573
40x40x5	3.71	662
45x35x5	3.71	662
45x45x5	4.21	751

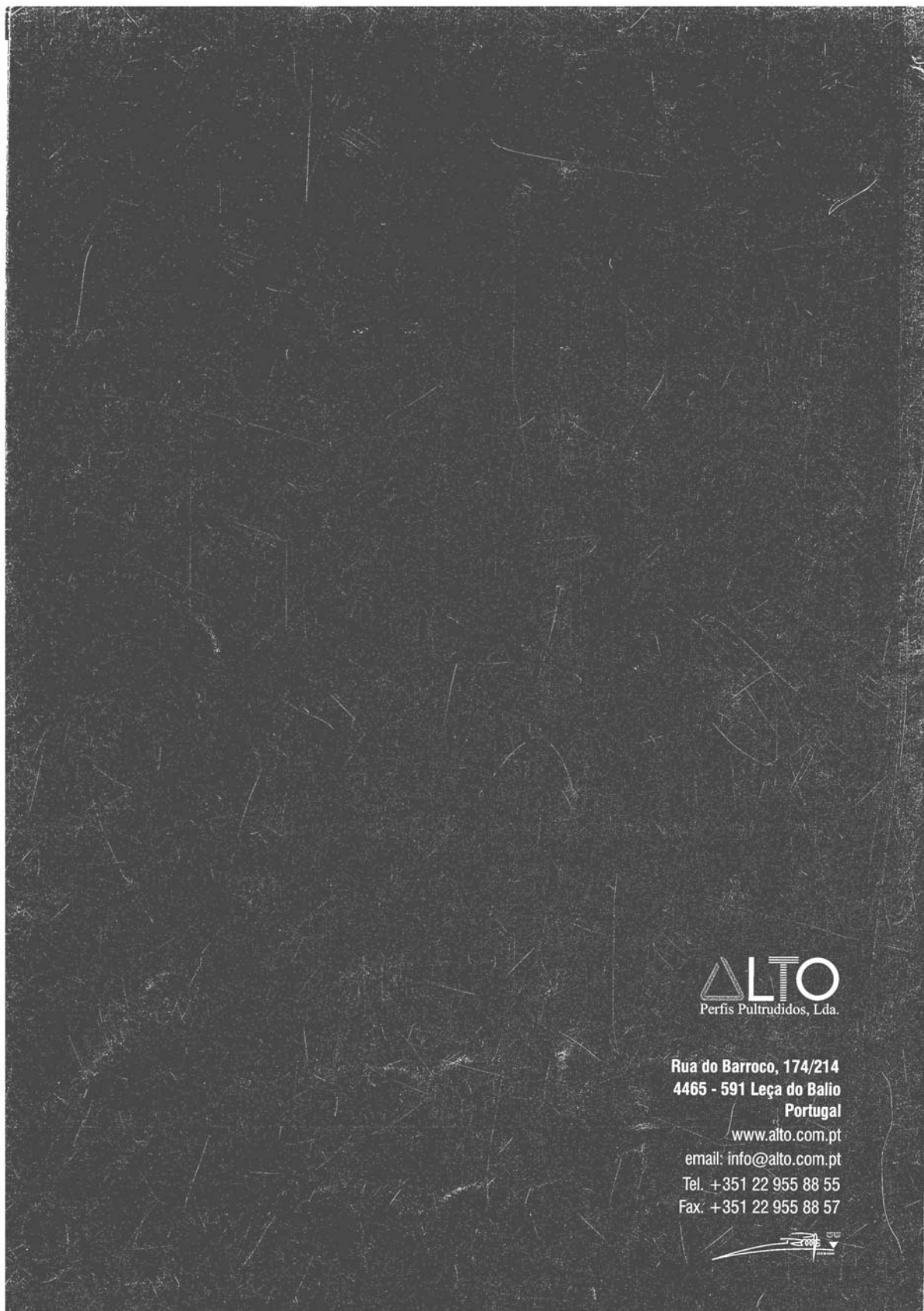
 OSSO DE CÃO (dogbone) Dogbone		
axbxe (mm)	Área (cm ²)	Peso (g/m)
14x12x4	1.26	256
20x16x8	2.55	513

 Tubo Quadrado/Rectangular Square/Rectangular Tube		
axbxe (mm)	Área (cm ²)	Peso (g/m)
50x50x5	8.77	1.565
60x30x2.5x3		800
69x29x2.5x3		

 Perfil I I-profile		
axbxe (mm)	Área (cm ²)	Peso (g/m)
25x14x3		300
100x50x8		2730
150x75x8		3100

 PERFIL EM W W-profile		
axbxe (mm)	Área (cm ²)	Peso (g/m)
100x14x3	3.78	652

Instalações Fabris Provisórias
INEGI - CEMACOM (Unidade de Materiais Compósitos)
Rua do Barroco, 174/214
Loça do Balio - 4465 S. Mamode de Infesta
Telef. 9537348/51 • Fax. 9537352



Rua do Barroco, 174/214
4465 - 591 Leça do Balio
Portugal
www.alto.com.pt
email: info@alto.com.pt
Tel. +351 22 955 88 55
Fax: +351 22 955 88 57



ARALDITE® 420 A/B – ADESIVO

FICHAS TÉCNICAS

2000



Adhesives and Tooling

Structural Adhesives

Aerospace Adhesives

Araldite® 420 A/B

Two component epoxy adhesive

Key properties

- Very high shear and peel strength
- Extremely tough and resilient
- Good moisture resistance
- Bonds a wide variety of materials including metal, wood, rubber, glass fibre reinforced composites and many plastics

Description

Araldite 420 A/B is a two component, room temperature curing paste adhesive of high strength and toughness.

It is suitable for a wide variety of metal, honeycomb and fibre reinforced composite bonding applications. It has very high shear strength even at temperatures up to 70°C and good peel strength.

Typical uses include:

- bonding inserts, ferrules, aluminium and composite edge members, joining strips, etc, in both metallic and non-metallic honeycomb sandwich structures.
- Fabrication of composite components using the cut and fold technique.

Typical product data

Property	Araldite 420 A	Araldite 420 B	Mixed adhesive	Test Method
Colour (visual)	yellow	blue	dark green	visual
Specific gravity	ca.1.2	ca.1.0	1.1 - 1.2	ASTM-D-792
Viscosity at 25°C (Pas)	100 - 300	0.6 - 1.4	35 - 45	ASTM-D-2196
Gel time (100 gm at 25°C)mins	-	-	60	ASTM-D-2471

Processing

Pretreatment

The strength and durability of a bonded joint are dependant on proper treatment of the surfaces to be bonded.

At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone, trichloroethylene or proprietary degreasing agent in order to remove all traces of oil, grease and dirt. Alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used.

The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment.

Mix ratio	Parts by weight	Parts by volume
Araldite 420 A	100	100
Araldite 420 B	40	50

Stir the two components thoroughly together until the two colours are completely blended, without any visible streaks. Automatic mixing / dispensing may be used.

Araldite 420 A/B is also supplied in cartridges incorporating mixers and can be applied as ready to use adhesive with the aid of the tool recommended by Huntsman Advanced Materials.

Usable life

Due to exothermic reaction between the two components the usable life depends to some extent on the quantity mixed and the shape of the container. Use of a shallow container will extend the usable life and as a rough guide:

for 50gm mix, usable life at 25°C is 2 hours

for 100gm mix, usable life at 25°C is 1 hour

Application of adhesive

The resin/hardener mix is applied directly or with a spatula to the pretreated and dry joint surfaces.

A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint.

The joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied. An even contact pressure throughout the joint area will ensure optimum cure.

Curing

Once applied, Araldite 420 A/B will gel in 3 - 4 hours at 25°C and will be sufficiently cured after 5 hours to allow the bonded component to be handled. After 4 - 5 days the adhesive will obtain 90% of its full strength and achieve full strength after 1 to 2 weeks at room temperature.

Cure can be accelerated by heating. 4 hours at 50°C or 1 hour at 120°C will be sufficient to achieve full strength.

Shear properties can be improved, particularly at elevated temperatures, by post-curing for up to 24 hours at 70°C.

Lap shear strength after various cure times at 23°C

5 hours: 1 N/mm²

6 hours: 8 N/mm²

7 hours: 9 N/mm²

Typical cured properties

These figures are for guidance and do not constitute a specification.

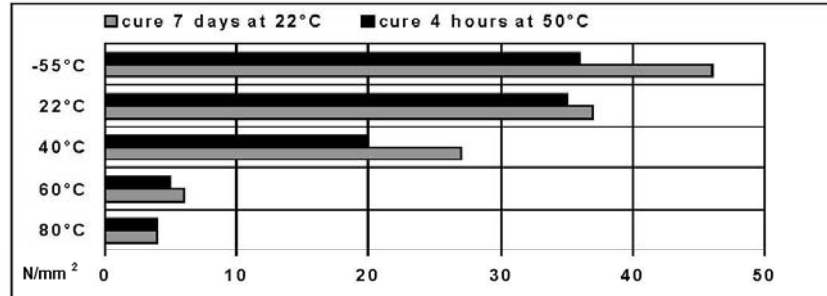
Bell peel 150 N/25mm (60°C peel using 2024-T3 clad aluminium adherends at 25°C).

Honeycomb bonding results (in accordance with MIL-A-25463)

Beam shear at 22°C: 12kN (core failure); Flatwise tensile at 22°C: 8.5 N/mm²

Metal: 2024 - T3; Core: 7.9 - ¼ - 40 5052

Variation of lap shear strength as a function of temperature



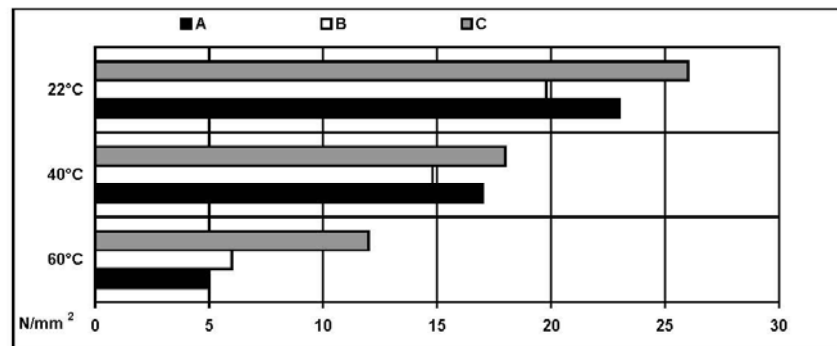
Lap shear strength: variation after exposure to 95% RH at 60°C

(cured 7 days at 23°C)

C = 30 days exposure

A = 90 days + drying for 16 hours at 60°

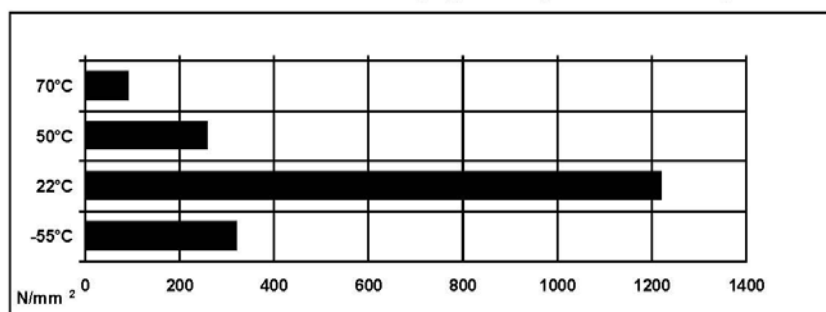
B = 90 days exposure



Honeycomb peel performance

(Cured 7 days at 23°C)

Tested in accordance with MIL-A-25463 using approx. 300g/m² of Araldite 420 per skin.



Effects of alternative cure schedules on lap shear strength performance (LSS)

Test	Results		Test methods
	Test temp (°C)	LSS (MPa)	
70°C for	1 hour	22	A.E.C.M.A. EN2243-1
	2 hours	70	
	6 hours	70	
	16 hours	70	
	24 hours	70	
		37	
120°C for 1 hour		4	A.E.C.M.A. EN2243-1
		6	
		11	
		10	
		8	
		43	
		29	A.E.C.M.A. EN2243-1
		10	

Storage

Araldite 420 A/B may be stored for up to 36 months at 2-40°C, provided that the components are stored in their original sealed containers. The expiry date is indicated on the label.

Handling precautions**Caution**

Huntsman Advanced Materials products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in publication No. 24264/3/e Hygienic Precautions For Handling Plastics Products and in the Huntsman Advanced Materials Material Safety Data sheets for the individual products. These publications are available on request and should be referred to for fuller information.

Adhesives and Tooling

All recommendations for the use of our products, whether given by us in writing, verbally, or to be implied from the results of tests carried out by us, are based on the current state of our knowledge. Notwithstanding any such recommendations the Buyer shall remain responsible for satisfying himself that the products as supplied by us are suitable for his intended process or purpose. Since we cannot control the application, use or processing of the products, we cannot accept responsibility therefor. The Buyer shall ensure that the intended use of the products will not infringe any third party's intellectual property rights. We warrant that our products are free from defects in accordance with and subject to our general conditions of supply.

Vantico Limited
Duxford, Cambridge
England CB2 4QA

Tel: +44 (0) 1223 832121
Fax: +44 (0) 1223 493322
www.huntsman.com

© Vantico Ltd, 2000
◆ Araldite is a registered trademark of Vantico GmbH, Basel, Switzerland, trading as Huntsman Advanced Materials

MBRACE RESIN 55 – ADESIVO

FICHAS TÉCNICAS

2003

MBrace Resin 55

(MBrace Saturante)

Resina epoxy saturante para MBrace Mantas

Descrição

Resina epoxy em dois componentes, fluida e isenta de solventes.

Campos de aplicação

Impregnação, fixação e estruturação de mantas de fibra de carbono, vidro ou aramida MBrace, p/ reforço:

- Pilares à compressão.
- Vigas ao corte.
- Vigas à flexão.

Para aplicações não indicadas consultar a Bettor MBT.

Vantagens

- Elevadas resistências. Excelente aderência.
- Fácil aplicação. Fácil impregnação das fibras.
- Reduzida viscosidade.
- Sem solventes.
- Pigmentação translúcida.

Rendimento / Dosagem

O consumo habitual de resina misturada, aplicada em duas demãos e impregnando completamente as fibras é de 650 a 800 g/m². O consumo sobre superfícies metálicas é de aproximadamente 180 g/m².

Estes consumos são teóricos e dependem da rugosidade do suporte. Para determinar os consumos exactos deverão realizar-se ensaios representativos em obra.

Modo de aplicação

Preparação da base

A resina adesiva MBrace Resin 55 deve aplicar-se sobre MBrace Resin 50 após 30 minutos e antes de passadas 48 horas da sua aplicação.

Se tiver passado um tempo superior deverá lixar-se a superfície e aplicar novamente o produto. A superfície a aplicar deverá estar isenta de qualquer impureza ou contaminação superficial.

A base deverá ter uma temperatura mínima de 5°C e 3°C acima do ponto de orvalho correspondente.

Características Técnicas

Densidade:	aprox. 1,04 g/cm ³
Pot life (25°C):	aprox. 45 min.
Ensaio à tracção (ASTM D638)	
rotura à tracção	54 N/mm ²
deformação em rotura:	2,5%
Módulo elástico:	3034 N/mm ²
Ensaio à flexão (ASTM D790)	
rotura à flexão:	124 N/mm ²
módulo à flexão:	3731 N/mm ²
E. à compressão (ASTM D695)	
rotura à compressão:	86 N/mm ²
módulo à compressão:	2621 N/mm ²
Aderência:	rotura do betão
Espessura máxima por camada sem escorrimento:	0,6 mm

Tempos de endurecimento obtidos a 20°C e 65% de H.R. Temperaturas superiores reduzem-nos e inferiores aumentam-nos. Os dados técnicos apresentados são fruto de resultados estatísticos e não representam mínimos garantidos.

Mistura

MBrace Resin 55 é fornecido nas proporções adequadas para realizar a mistura directamente. Não se recomendam em caso algum misturas parciais. Verter o comp. II no recipiente do comp. I (recipiente de trabalho). Misturar cuidadosamente com berbequim com agitador (tipo M17) a uma velocidade máxima de 400 r.p.m., durante pelo menos 3 minutos ou até obter uma argamassa homogénea e sem grumos.

Aplicação

Distribuir MBrace Resin 55 uniformemente sobre toda a superfície com a ajuda de trincha ou rolo, garantindo uma impregnação completa. A aparência do MBrace Resin 55, quando aplicado com rolo, deve ser azul translúcida.

De seguida embeber a manta MBrace na MBrace Resin 55 aplicada, pressionado com um rolo de ranhu-

Bettor MBT Portugal, S.A.

Sede: P. Ind. Cabra Figa, Albarraque - 2635-047 RIO DE MOURO
Telef. 21 915 85 50 Fax: 21 915 85 51
D. Norte: Z. Ind. da Varziela, Rua G, lote 2 - 4480-625 ÁRVORE
Telef. 252 248 640 Fax 252 248 641



degussa.

Construction Chemicals

ras metálicas, até conseguir uma impregnação perfeita da fibra com o conjunto.

Passados cerca de 30 minutos pode aplicar-se a segunda camada de MBrace Resin 55.

Deve procurar-se uma união íntima entre a resina aplicada em duas fases, as fibras intermédias e o suporte inferior. A manta negra de fibra deve ser visível. A cor resultante da aplicação variará em função da sobreposição e das variações de espessura. As zonas de sobreposição também deverão ser translúcidas.

Limpeza de ferramentas

Pode ser feita com diluente universal enquanto o produto estiver fresco. Depois de endurecido só pode ser removido mecanicamente.

Embalagem e armazenamento

MBrace Resin 55 é fornecido em embalagens de 5 Kg. Armazenar em local fresco e seco, nas suas embalagens originais fechadas, até 18 meses.

Precauções de segurança

Devem observar-se as medidas preventivas usuais para a utilização de produtos químicos, como por exemplo não comer, beber ou fumar durante a aplicação e lavar as mãos antes de uma pausa e no final do trabalho. Pode consultar-se informação específica de segurança no manuseamento e transporte do produto na sua Ficha de Segurança. A eliminação do produto e da sua embalagem deve realizar-se de acordo com a legislação e é da responsabilidade do aplicador final.

Deve ter-se em conta

- MBrace Resin 55 deixará as mantas de fibra de carbono embebidas através da impregnação com duas aplicações sucessivas.
- Para garantir o êxito do reforço deve assegurar-se uma união perfeita entre o compósito MBrace e o suporte, de forma a que permita uma correcta transmissão de esforços entre o elemento e o compósito resistente. Uma falha de aderência entre o suporte e o compósito ou entre os componentes do compósito conduz irrevogavelmente a uma falha do reforço.
- Não aplicar sobre suportes húmidos ou com temperaturas inferiores a +5°C.
- Não devem realizar-se misturas parciais dos conteúdos das embalagens dos componentes.
- Não adicionar água, solventes ou outras substâncias que possam afectar as propriedades do material endurecido.
- Respeitar os tempos máximos de espera entre a aplicação dos diferentes produtos que compõem o sistema MBrace.
- Não preparar uma quantidade de mistura superior à que se possam aplicar durante o período de trabalho. O tempo disponível para realizar o trabalho, a temperatura e a complexidade do material determinarão qual a quantidade de produto que pode preparar-se de uma vez.
- Em tempo quente deve manter-se o material frio e protegido da luz solar directa. O tempo de trabalhabilidade real em tempo quente pode ser prolongado se se mantiver o produto fresco, antes e depois da mistura, e se se introduzir num recipiente com uma mistura de água fria e gelo.

Revisão 0 em Maio 2003

O aconselhamento técnico sobre como usar os nossos produtos, verbal ou de forma escrita, é baseado nos nossos melhores conhecimentos científicos e práticos. Não são assumidas quaisquer garantias e/ou responsabilidades em relação aos resultados finais dos trabalhos executados com os nossos produtos. O dono de obra, o seu representante ou o empreiteiro, devem verificar a adequabilidade dos nossos produtos aos usos e finalidades pretendidas, bem como as dosagens e consumos. É da responsabilidade do utilizador, obter a ficha técnica mais actual que eliminará todas as edições anteriores.

SIKADUR® 330– ADESIVO

FICHAS TÉCNICAS

2003

Ficha Técnica
Edição de Setembro 2003
Nº de identificação: 5.33
Versão nº 2
Sikadur® 330

Sikadur® 330

Resina de impregnação para telas de reforço

Descrição do produto	Resina de epoxi em dois componentes, isenta de solventes, para impregnação.
Vantagens	■ Excelente comportamento tixotrópico em superfícies verticais e tectos. ■ Boa resistência mecânica. ■ Fácil de aplicar à espátula e rolo de impregnação. ■ Isento de solventes.
Dados do produto	
Cores	Componente A: branco. Componente B: cinzento.
Fornecimento	Embalagens de 5 kg.
Armazenagem	O produto deve estar armazenado nas embalagens de origem não encetadas, a temperaturas entre +5°C e +25°C.
Conservação	Conserva-se 18 meses após a data de fabrico
Dados técnicos	
Base	Resina de epoxi.
Proporções de mistura	A:B = 4:1 em peso.
Massa volúmica	~ 1,31 kg/dm ³ (A+B misturados).
Tempo de vida da mistura (pot-life)	A +15°C - aprox. 90 min (5 kg). A +35°C - aprox. 30 min (5 kg).
Tempo disponível para aplicação	30 minutos (a 23°C).
Viscosidade	Pastoso, não fluído.
Temperatura de aplicação	+15°C a +35°C (base e ambiente).
Tensão de aderência à tracção sobre betão (EN 24624)	Sobre betão decapado a jacto de areia, após 1 dia de cura a > 15°C: rotura coesiva no betão.
Resistência à tracção (DIN 53455)	30 N/mm ² (curado 7 dias a +23°C).



Módulo de elasticidade à flexão (DIN 53452) 3.800 N/mm² (curado 7 dias a +23°C).

Temperatura de deflexão por calor (ASTM D 648) Curado: 7 dias, a +15°C: 41°C.
7 dias, a +23°C: 47°C.
7 dias, a +35°C: 53°C.

Sistemas

Preparação da superfície Preparar a base de betão por meio de jacto de areia ou fresagem. Remover de seguida quaisquer partículas soltas e poeiras, por meio de aspirador. A base deve ficar limpa, isenta de gordura e óleo e seca (máximo teor de humidade permitido: 4%). O betão deve ter 28 dias pelo menos. A superfície à qual se vai colar o reforço deve estar nivelada, não devendo os vincos ou rebarbas de cofragem serem superiores a 0,5 mm. Irregularidades superiores devem ser previamente regularizadas com Sikadur 41 ou com uma mistura de Sikadur 30 e Carga 2 (relação de mistura 1:1 em peso). A resistência superficial à tracção da base deve ser de pelo menos 1,0 N/mm². Arredondar as arestas da estrutura para um raio de pelo menos 10 mm. Esta operação pode ser feita com um disco de diamante.

Mistura Primeiramente, mexer e homogeneizar cada um dos componentes em separado. Depois, adicionar o componente B ao componente A, rapando bem a lata do componente B com um lambaz de plástico ou borracha. Misturar com misturador eléctrico durante aprox. 3 minutos até obter uma coloração uniforme, sem quaisquer laivos. Vazar de seguida a mistura para um balde limpo e voltar a misturar durante aprox. 1 minuto a baixa velocidade, para evitar introduzir ar na mistura. A contagem do tempo de vida da mistura (*pot-life*) inicia-se a partir do momento da mistura de A+B (resina e endurecedor). A temperaturas ambientes baixas será mais longo, e inversamente, a temperaturas altas, será mais curto. Quanto maior for a quantidade misturada numa só vez, mais curto será o *pot-life*. Recomenda-se preparar pequenas quantidades de cada vez, ou refrigerar cada componente separadamente antes da mistura.

Aplicação do sistema

- Aplicar a resina misturada Sikadur 330 na base previamente preparada, com uma espátula ou trincha, com um consumo de aprox. 0,7 a 1,2 kg/m², dependendo da rugosidade da base.
- Colocar a tela SikaWrap Hex 230C sobre a resina fresca, na direcção desejada. Embeber a tela nesta resina, repassando a tela cuidadosamente com rolo especial de plástico (ref^o: SikaWrap Hex Roller), até a resina ser obrigada a refluir através dos fios da tela.
- Aplicação de mais que uma camada de tela (máximo três): Aplicar mais resina, consumo de aprox. 0,5 kg/m². Esta operação tem de ser feita dentro de 60 minutos (a +20°C) após a aplicação da camada anterior. Se tal não for possível, então deve observar-se um intervalo de pelo menos 12 horas antes de aplicar a próxima camada. Depois, repetir o que está prescrito na alínea b).
- Eventualmente, poder-se-á aplicar uma camada adicional de resina com um consumo de aprox. 0,5 kg/m² e polvilhá-la em fresco com areia de quartzo. Esta camada rugosa poderá servir de ponte para aderência de eventuais revestimentos ou rebocos que se pretenda aplicar.

Limpeza de ferramentas Limpar ferramentas imediatamente após aplicação com Solutivo de Limpeza Colma. Depois de curado, Sikadur 330 só pode ser removido mecanicamente.

Importante

- A sobreposição de telas deve ser de pelo menos 100 mm, na direcção das fibras.
- Quando várias redes de tela são colocadas lado a lado, não é necessário sobrepor.
- A baixas temperaturas e/ou alta humidade relativa, a superfície pode tornar-se colativa. Antes de aplicar uma posterior camada de resina, ou de tela (12 horas depois de ter aplicada a anterior), a pegajosidade colativa deverá ser removida da seguinte forma: esfregar com esponja saturada em água e lavar depois abundantemente com água.
- Resíduos de Sikadur 330 já misturado devem ser deixados a endurecer dentro da própria lata de metal, em quantidades não superiores a 1 kg por lata.
- Proteger os reforços da exposição directa à radiação solar.
- A temperatura ambiente durante a aplicação deve estar pelo menos 3°C acima do ponto de orvalho.

Risco e segurança

Medidas de segurança

Antes da aplicação, proteger as mãos e pele exposta com creme de protecção. Usar vestuário de protecção (luvas, óculos). No caso de contacto accidental com olhos e mucosas, lavar de imediato com muita água limpa e consultar um especialista sem demoras. No estado líquido, Sikadur 330 contamina a água, pelo que não deve ser lançado nas canalizações, cursos de água e terrenos. Para informações de pormenor, consultar a respectiva ficha de segurança.

"O produto está seguro na Cº Seguros Metrópole, SA (Apólice nº 4036758), a título de responsabilidade civil do fabricante".

A informação e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar as versões mais recentes das fichas técnicas dos respectivos produtos, que serão entregues sempre que pedidas.



Sika Portugal, SA
R. de Santarém, 113
4400-292 V. N. Gaia
Portugal
Tel. +351 22 377 69 00
Fax +351 22 370 20 12
www.sika.pt



BETÃO – CARATERIZAÇÃO EM LABORATÓRIO

BOLETIM DE ENSAIO DO LEMC

2010



MATERIAL APRESENTADO PARA ENSAIO: 2 amostras de agregados referenciadas por “BR1.BS.33” e “Areia 0/4 (Zamora)” uma amostra de cimento referenciado por “CEM I 42,5R” e uma amostra de adjuvante “V3005”.

1. Amassadura

Foi realizada uma amassadura de betão no dia 07-06-10. A composição utilizada encontra-se descrita na tabela abaixo.

Referência da amostra : Amassadura I

Referência	Quantidade (amassadura de 40l)
BR1.BS.33	31,8 kg
Areia 0/4 (Zamora)	44,1 kg
Cimento - CEM I 42,5R	15 kg
Água	9,9 l
Adjuvante – V3005	0. kg

2. Ensaio do betão fresco

2.1. Ensaio de abaixamento (NP EN 12350 -2)

Identificação da amostra	Local de execução	Data de execução	Hora de Ensaio	Espalhamento (mm)
Amassadura I	LEMC	07-06-2010	16:30	90



3. Ensaios do betão endurecido

3.1. Resistência à compressão do betão endurecido (NP EN 12390 -3)

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS PROVETES:

Identificação do provete	Idade do provete	Dimensões (cm)	Massa (kg)	Massa volúmica (kg/m ³)	Defeitos visíveis nas superfícies
1 07.06.2010	7 dias	15,0x15,1x15,0	7,539	2219	Nenhum
2 07.06.2010	7 dias	15,0x15,1x15,0	7,529	2216	Nenhum
3 07.06.2010	28 dias	15,0x15,2x15,0	7,495	2192	Nenhum
4 07.06.2010	28 dias	15,0x15,1x15,0	7,435	2188	Nenhum
5 07.06.2010	28 dias	15,0x15,2x15,0	7,541	2205	Nenhum

RESULTADOS DO ENSAIO:

Identificação do provete	Data de ensaio	Idade do provete	Modelo de rotura	Carga máxima de rotura (kN)	Resistência à compressão (N/mm ²)
1 07.06.2010	14.06.2010	7 dias	Normal	623	27,5
2 07.06.2010	14.06.2010	7 dias	Normal	614	27,0
3 07.06.2010	05.07.2010	28 dias	Normal	707	31,0
4 07.06.2010	05.07.2010	28 dias	Normal	728	32,0
5 07.06.2010	05.07.2010	28 dias	Normal	714	31,5