

# DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE PRÉ-ESFORÇO PARA APLICAÇÃO DE LAMINADOS DE CFRP SEGUNDO A TÉCNICA NSM

Inês Gonçalves Costa  
Joaquim António Oliveira de Barros

Report 09-DEC/E-29

O presente projecto foi realizado no âmbito do projecto PTDC/ECM/73099/2006, financiado pela FCT.

Data: Dezembro 2009

Número de páginas: 23

Keywords: [Keywords]



School of Engineering



Department of Civil Engineering



University of Minho

**FCT**

Fundação para a Ciência e a Tecnologia  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

Fundação para a Ciência e Tecnologia



# ÍNDICE

SUMÁRIO.....	1
1 APROXIMAÇÃO INICIAL DO SISTEMA A DIMENSIONAR.....	3
2 DIMENSIONAMENTO DA PEÇA DE ANCORAGEM.....	5
2.1 Análise da aproximação inicial da peça proposta.....	5
2.1.1 Condições de apoio e força aplicada.....	6
2.1.2 Deformada e tensões instaladas.....	7
2.2 Análise da peça e sistema de reforço proposto.....	9
2.2.1 Condições de apoio e força aplicada.....	10
2.2.2 Deformada e tensões instaladas.....	11
2.3 Análise da peça final.....	13
2.3.1 Condições de apoio.....	14
2.3.2 Deformada e tensões instaladas.....	14
3 DIMENSIONAMENTO DAS BARRAS PARA APLICAÇÃO DO PRÉ-ESFORÇO.....	16
3.1 Escolha do tubo telescópico.....	16
3.2 Tubo telescópico 32–50.....	17
4 MONTAGEM DO SISTEMA DE PRÉ-ESFORÇO.....	19
5 CONCLUSÕES.....	20

## SUMÁRIO

Uma nova técnica para o reforço à flexão de vigas de betão armado de acordo com a técnica NSM (Near Surface Mounted na terminologia inglesa) usando laminados de fibra de carbono (Fibre Reinforced Polymer) está a ser desenvolvida. Espera-se com esta técnica aumentar a resistência à flexão das vigas a reforçar, recuperar parte da deformação instalada, reduzindo ou até mesmo fechando as fendas existentes. Estes efeitos resultarão em consideráveis benefícios em termos de integridade estrutural e durabilidade.

No que diz respeito à utilização de laminados NSM pré-esforçados, a pesquisa bibliográfica demonstra que pouco trabalho tem sido realizado nesta área. Quanto ao pré-esforço recorrendo a materiais compósitos colados externamente (Externally Bonded Reinforcement), as vantagens a ele associadas foram já relatadas na literatura (Wight et al., 2001, Nordin & Täljsten, 2006, Gaafar & El-Hacha, 2008):

- Fecho ou diminuição da abertura de fendas existentes;
- Retardamento do aparecimento de novas fendas;
- Benefícios em termos de integridade estrutural e durabilidade do betão;
- Restituição de pré-esforço ao elemento estrutural;
- Alívio de tensões instaladas na armadura convencional.

Não existe actualmente nenhuma técnica que permita a aplicação de laminados NSM pré-esforçados *in situ*. É portanto neste âmbito que surge este trabalho, no qual se pretende sugerir um protótipo que permita a aplicação desta técnica em casos de reforço reais.

Este sistema pretende tornar possível, de uma forma rápida, simples e eficiente, tensionar os laminados de CFRP antes da sua aplicação. Idealizou-se neste âmbito, em linhas gerais, um sistema que permitisse esse mesmo pré-tensionamento. Esse sistema consiste essencialmente na instalação de duas peças nas extremidades do laminado de CFRP, que serão progressivamente afastadas por intermédio de duas barras biarticuladas. Essas barras biarticuladas (elementos tubulares referidos na Figura 1c) serão, por sua vez, actuadas por um macaco hidráulico que obrigará o sistema a deformar-se. Um esboço deste sistema é ilustrado na Figura 1.

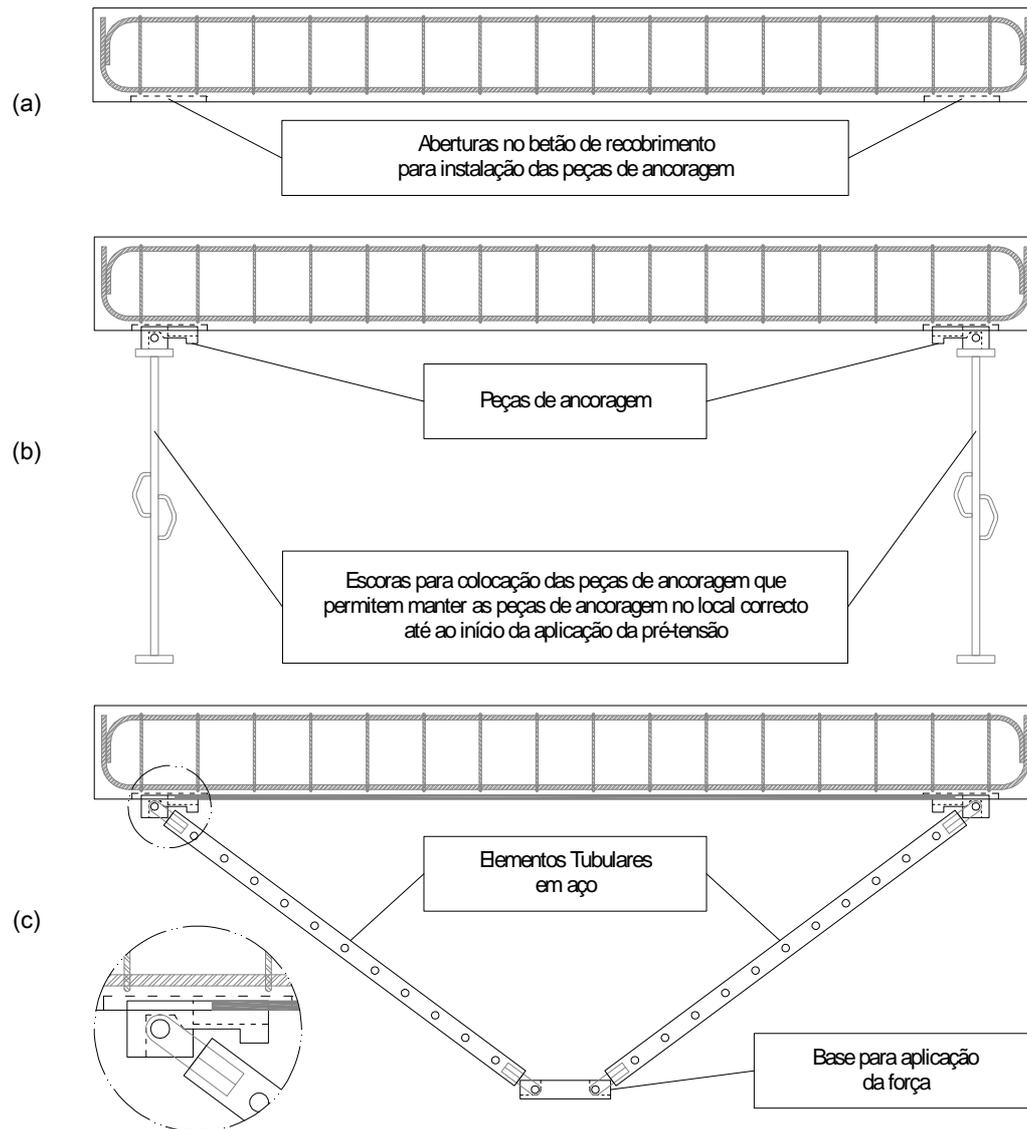


Figura 1 – Protótipo do sistema de aplicação de pré-tensão nos laminados de CFRP.

(a) Preparação da viga; (b) Colocação dos elementos de ancoragem; (c) Aplicação de pré-tensão.

## 1 APROXIMAÇÃO INICIAL DO SISTEMA A DIMENSIONAR

De modo a ter um ponto de partida razoável, realizaram-se alguns cálculos preliminares de modo a obter uma primeira estimativa das dimensões da peça de ancoragem. Os cálculos efectuados demonstram que é razoável admitir as dimensões apresentadas na Figura 2 como aproximação inicial. Na Figura 3 apresentam-se os cortes do protótipo sugerido, enquanto na Figura 4 se pode ter uma visualização do aspecto tridimensional do objecto em estudo.

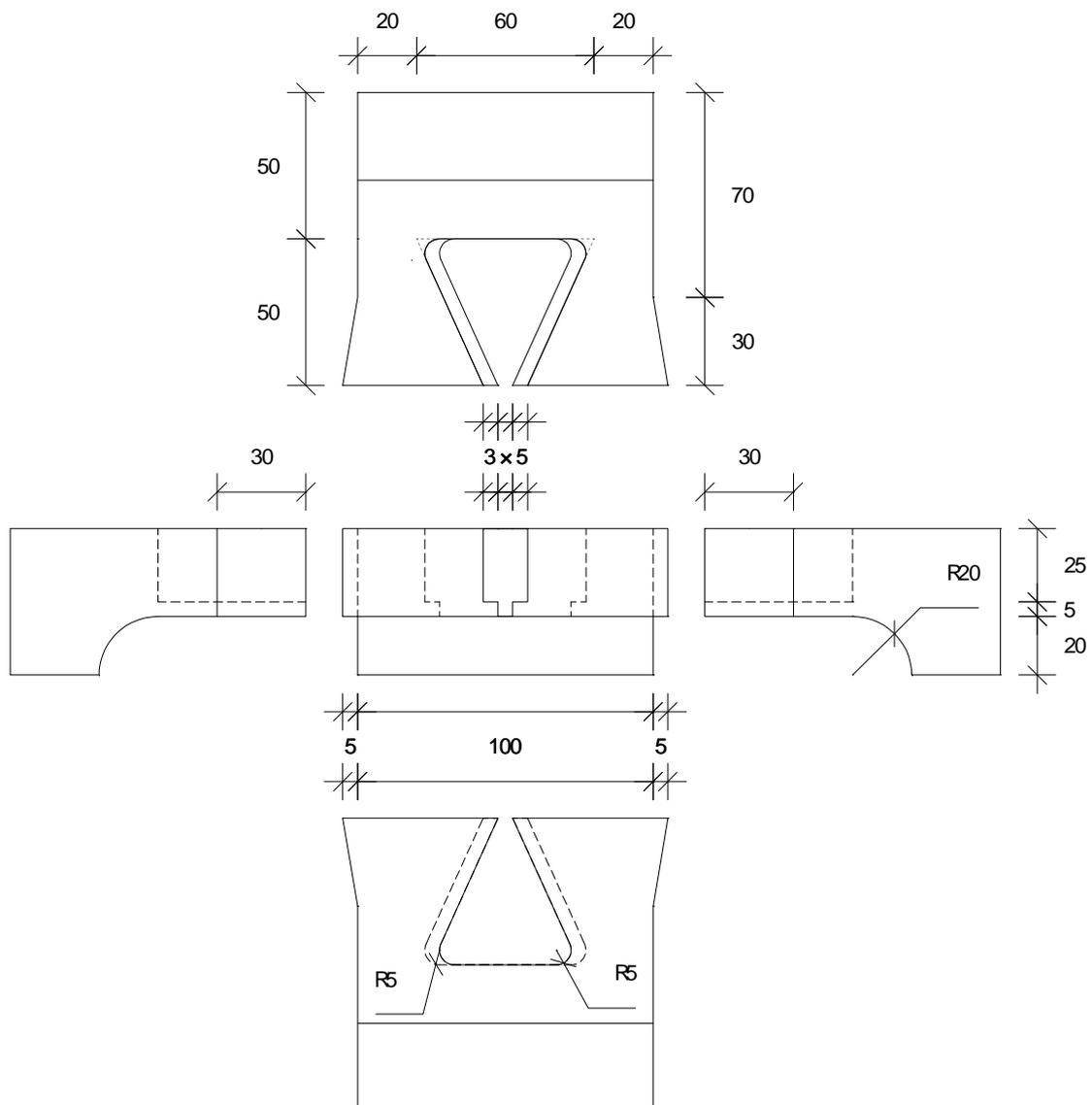


Figura 2 – Plantas e vistas da peça de ancoragem.

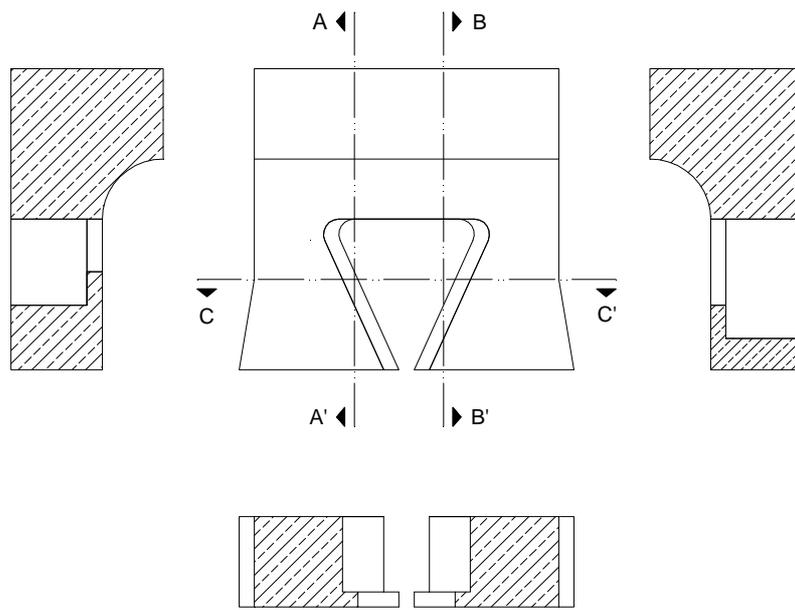


Figura 3 – Cortes da peça de ancoragem.

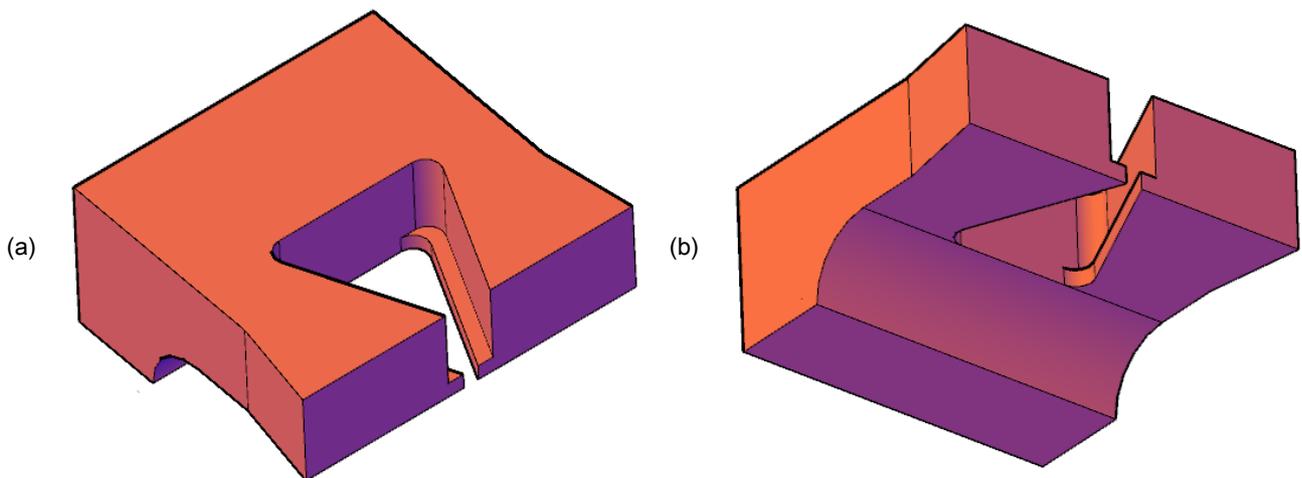


Figura 4 – Esquema 3D da peça de ancoragem proposta.

(a) Perspectiva superior; (b) Perspectiva inferior.

## 2 DIMENSIONAMENTO DA PEÇA DE ANCORAGEM

Neste ponto são apresentados os passos dados no sentido de dimensionar as peças de ancoragem. Inicialmente apresenta-se a análise da aproximação inicial, seguida das optimizações consideradas e respectivos resultados.

As diferentes geometrias analisadas foram introduzidas no programa de cálculo FEMIX. Uma vez que esta peça será executada em aço considerou-se portanto como tendo comportamento linear isotrópico. Considerou-se que este material terá um módulo de elasticidade ( $E$ ) de 200 GPa e um coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) de 0.3.

### 2.1 ANÁLISE DA APROXIMAÇÃO INICIAL DA PEÇA PROPOSTA

De modo a simplificar o dimensionamento desta peça de geometria francamente irregular, optou-se por ignorar nesta fase a existência de uma zona inferior arredondada, bem como da pequena plataforma destinada a sustentar as cunhas (ver Figura 5). À excepção dos detalhes anteriores, a restante geometria da peça foi respeitada, e tomada como base na elaboração da malha de elementos finitos.

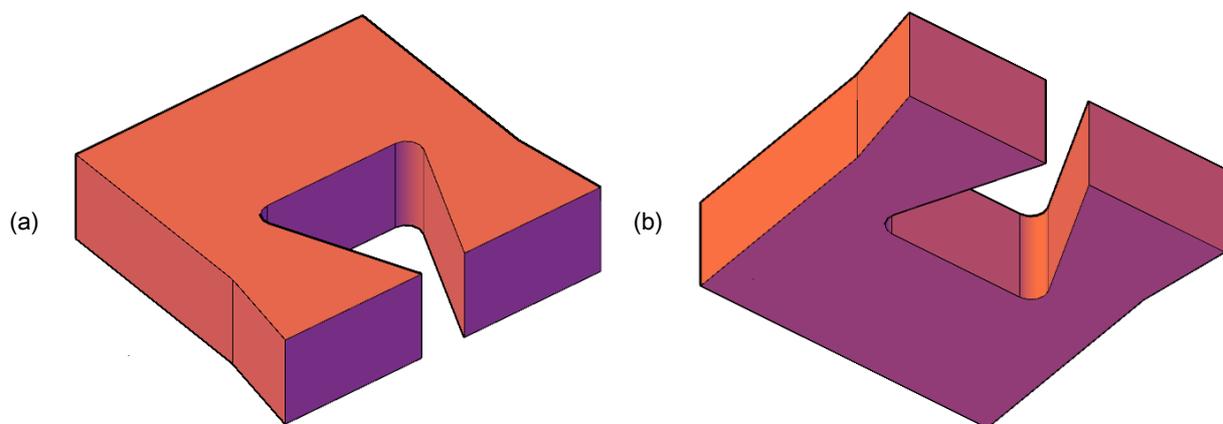


Figura 5 – Esquema 3D da aproximação inicial da peça proposta.

(a) Perspectiva superior; (b) Perspectiva inferior.

As dimensões consideradas neste ponto são as apresentadas nas plantas/vistas (Figura 2). Na Figura 6 apresentam-se os cortes da peça simplificada e inclui-se também a direcção dos eixos coordenados.

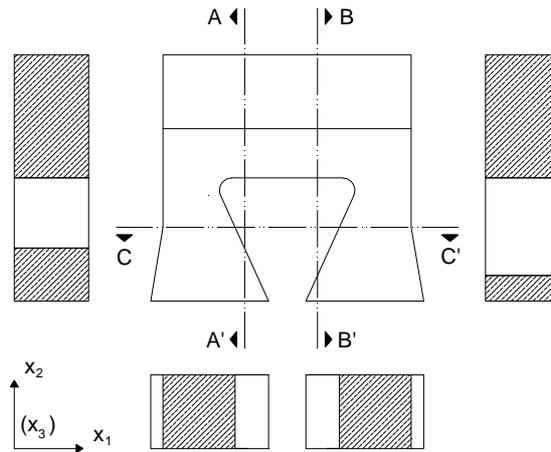


Figura 6 – Cortes da aproximação inicial da peça proposta.

### 2.1.1 CONDIÇÕES DE APOIO E FORÇA APLICADA

Adoptaram-se na modelação elementos de volume com 20 nós, e utilizou-se uma integração completa (3×3×3). As condições de apoio são apresentadas na Figura 7. Já os nós de aplicação da carga apresentam-se na Figura 8.

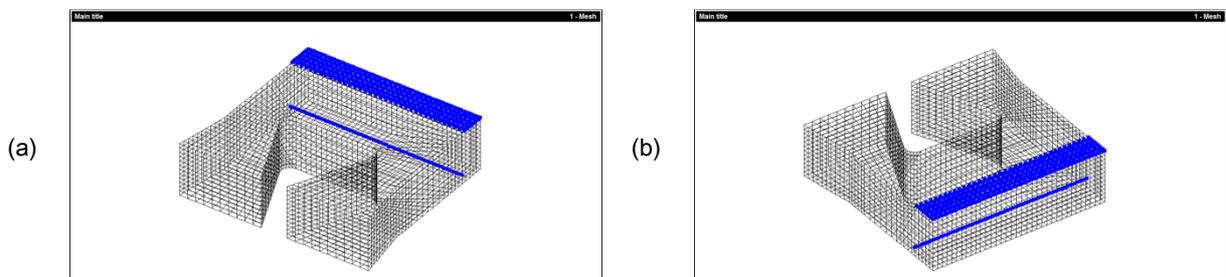


Figura 7 – Malha de elementos finitos e condições de apoio da aproximação inicial da peça proposta.

(a) Perspectiva superior; (b) Perspectiva inferior.

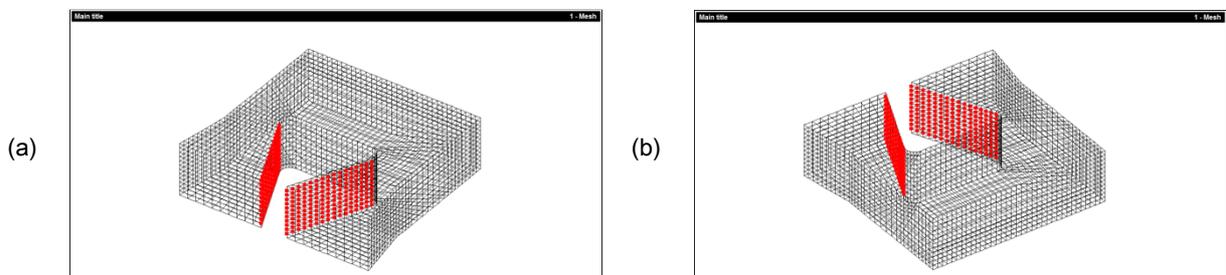


Figura 8 – Forças aplicadas na aproximação inicial da peça proposta.

(a) Perspectiva superior; (b) Perspectiva inferior.

Os apoios posteriores (no topo da peça) apenas impedem o deslocamento vertical ( $x_3$ ), uma vez que esta zona estará “encostada” ao elemento a pré-esforçar. Quanto aos apoios inferiores, zona que estarão ligadas as barras que imporão a pré-tensão, todos os deslocamentos naquele alinhamento estão impedidos (ver Figura 7). No interior das “pinças” será aplicada uma força total de 84 kN, distribuída ao longo da dimensão total livre daquela cavidade (Figura 8). A força de 84 kN foi escolhida como o valor máximo admissível considerando a resistência dos materiais que poderão ser utilizados<sup>1</sup>.

### 2.1.2 DEFORMADA E TENSÕES INSTALADAS

A deformada obtida após aplicação das cargas é a apresentada na Figura 9. Apresentam-se nessa Figura as diferentes vistas e duas perspectivas dessa mesma deformada.

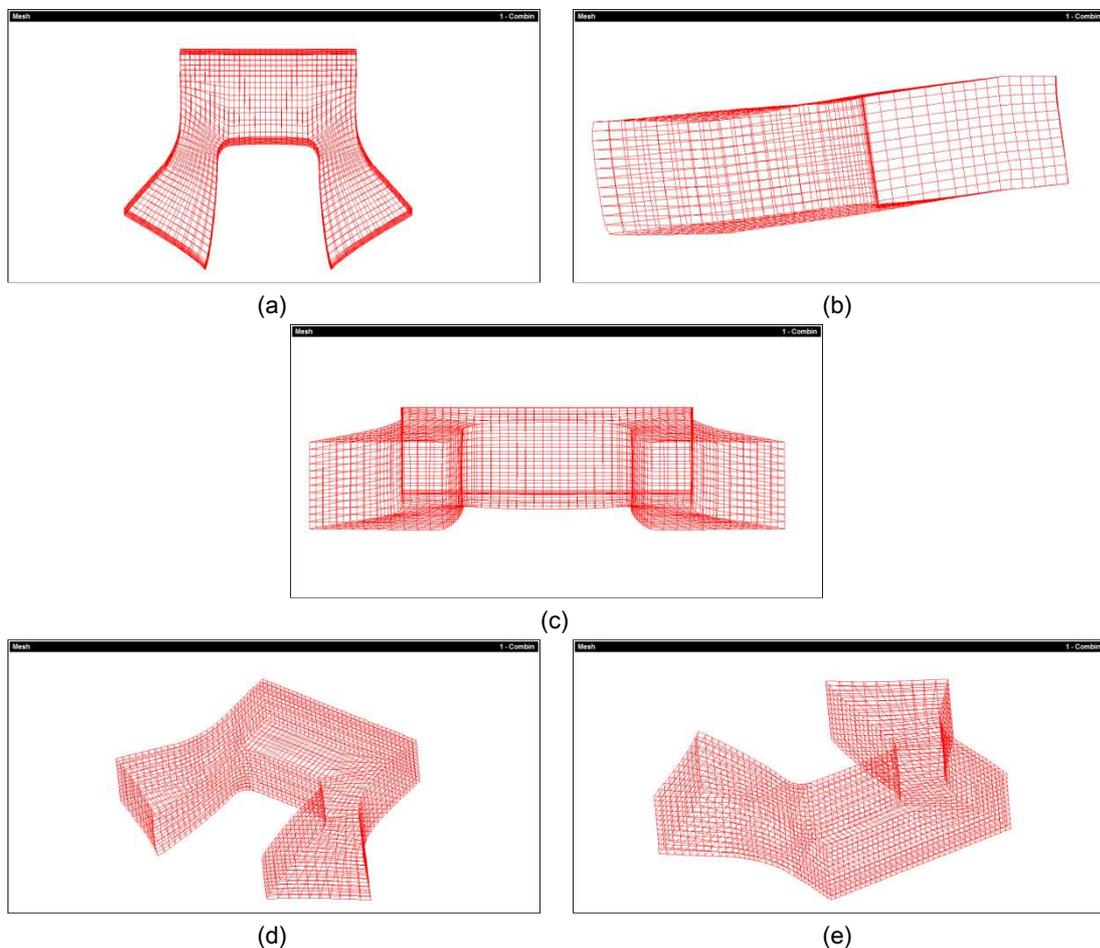


Figura 9 – Deformada da aproximação inicial da peça proposta (factor de escala = 100).

(a) Vista de topo ( $x_1x_2$ ); (b) Vista lateral ( $x_2x_3$ ); (c) Vista frontal ( $x_1x_3$ ); (d) Perspectiva superior; (e) Perspectiva inferior.

<sup>1</sup> Considerando um laminado de CFRP, com uma tensão última de 2800 MPa, uma secção de  $2.5 \times 15 \text{ mm}^2$ , um nível de pré-esforço máximo de 80% da resistência última do material:  $(0.8 \times 2800 \times 2.5 \times 15 = 84000 \text{ N})$ .

A distribuição das tensões mais condicionantes ( $\sigma_2$ ), obtida após a aplicação da força, apresenta-se na Figura 10. As tensões segundo os restantes eixos coordenados revelaram-se todas consideravelmente inferiores à tensão de cedência do aço considerado (355 MPa).

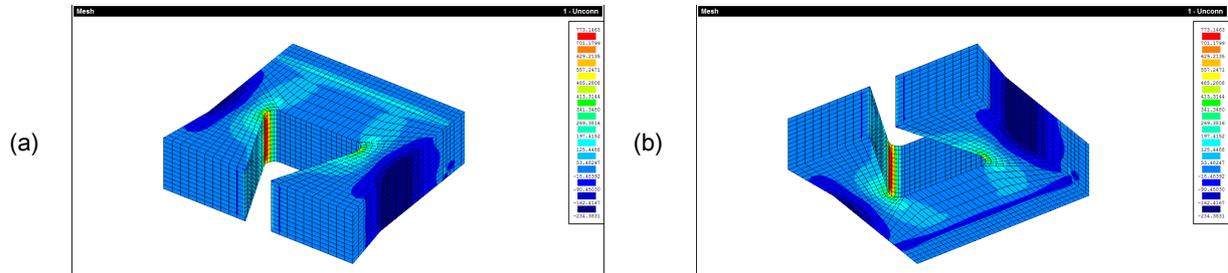


Figura 10 – Distribuição das tensões  $\sigma_2$  na aproximação inicial da peça proposta.

(a) Perspectiva superior; (b) Perspectiva inferior.

Como já foi referido, e se pode observar no Quadro 1, apenas segundo o eixo  $x_2$  existem tensões superiores a 355 MPa. A título indicativo, apresenta-se na Figura 11 a localização dos pontos com tensão  $\sigma_2$  instalada superior a 355 MPa.

Quadro 1 – Tensões máximas instaladas na peça proposta.

Tensão	Tensão máxima de compressão	Tensão máxima de tracção
	[MPa]	[MPa]
$\sigma_1$	127	262
$\sigma_2$	234	773
$\sigma_3$	167	146
$\tau_{12}$	275	275
$\tau_{23}$	97	52
$\tau_{31}$	48	48

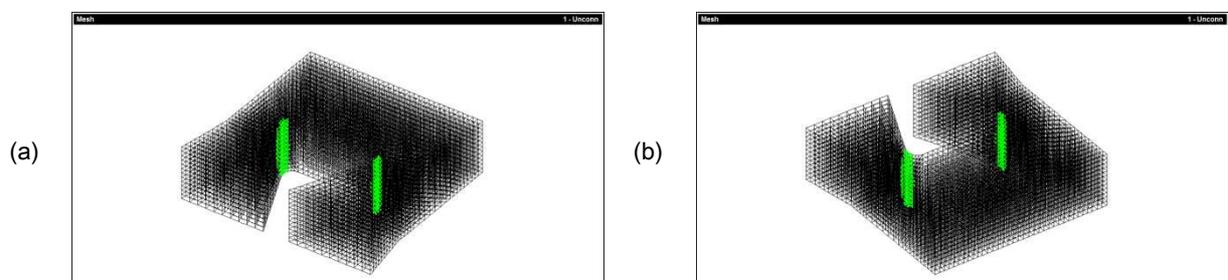


Figura 11 – Pontos da aproximação inicial da peça proposta com tensões superiores a 355 MPa.

(a) Perspectiva superior; (b) Perspectiva inferior.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que esta peça de ancoragem, por si só, não é suficiente para proceder à aplicação da pré-tensão nos laminados de CFRP. Sendo assim, propõe-se no ponto seguinte um sistema para a estabilização desta peça.

## 2.2 ANÁLISE DA PEÇA E SISTEMA DE REFORÇO PROPOSTO

Em conjunto com a peça apresentada em 2.1, propõe-se a utilização de um elemento que aumente a estabilidade deste sistema.

A peça que se propõe adicionar tem uma configuração U e as suas dimensões iniciais são apresentadas na Figura 12. Apresenta-se ainda na Figura 13 uma perspectiva desse sistema de reforço e na Figura 14 o modo como esta se encaixa na peça anteriormente proposta.

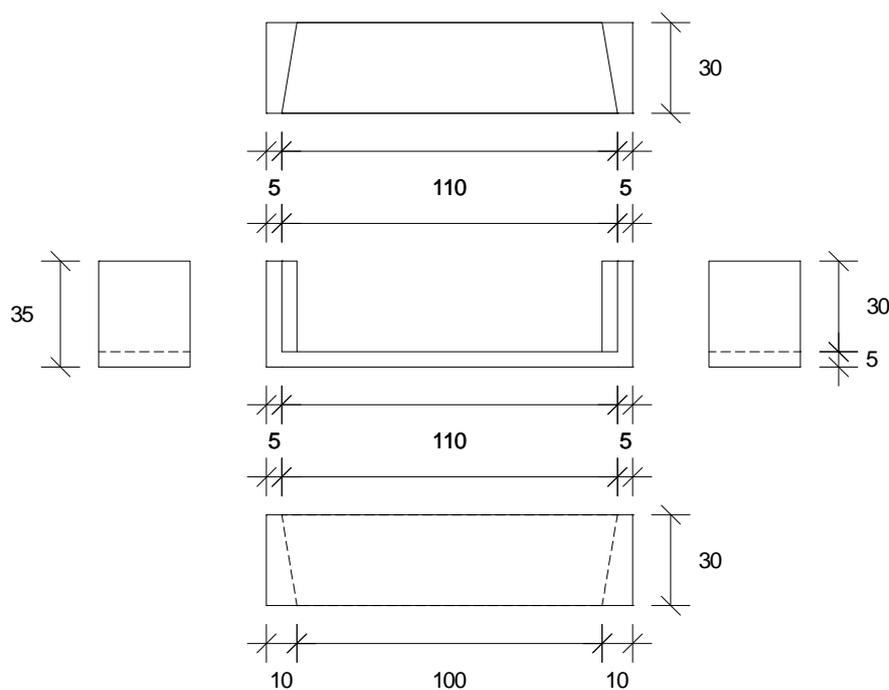


Figura 12 – Plantas e vistas peça de reforço.

Esta nova geometria e as características de aço anteriormente apresentadas foram introduzidas no mesmo software de cálculo (FEMIX). Por simplificação, optou-se por analisar esta combinação de elementos como se estes formassem uma peça única. Esta consideração é obviamente irreal, uma vez que na superfície entre estas peças os esforços são transmitidos por contacto, ao contrário do que se irá considerar.

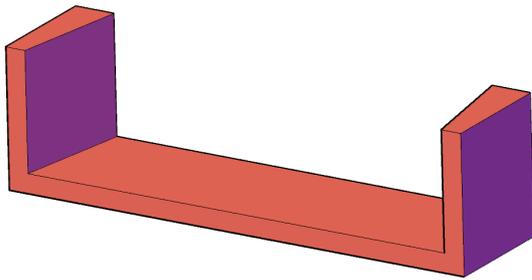


Figura 13 – Esquema 3D da peça de reforço.

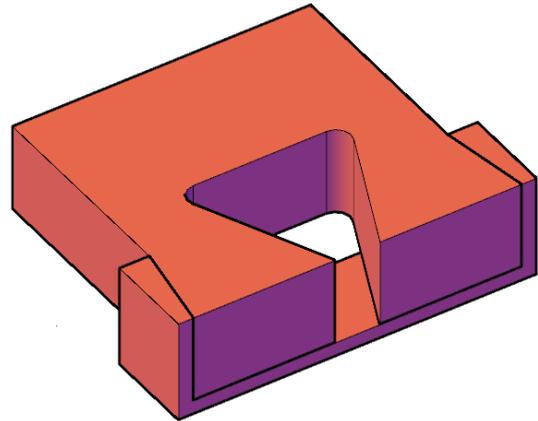


Figura 14 – Esquema 3D da peça proposta juntamente com a peça de reforço.

### 2.2.1 CONDIÇÕES DE APOIO E FORÇA APLICADA

Adoptaram-se também nesta modelação elementos de volume com 20 nós e utilizada uma integração completa (3×3×3). As condições de apoio representam-se na Figura 15. Os apoios colocados, bem como a força aplicada (Figura 16), obedecem aos mesmos critérios impostos em 2.1.1.

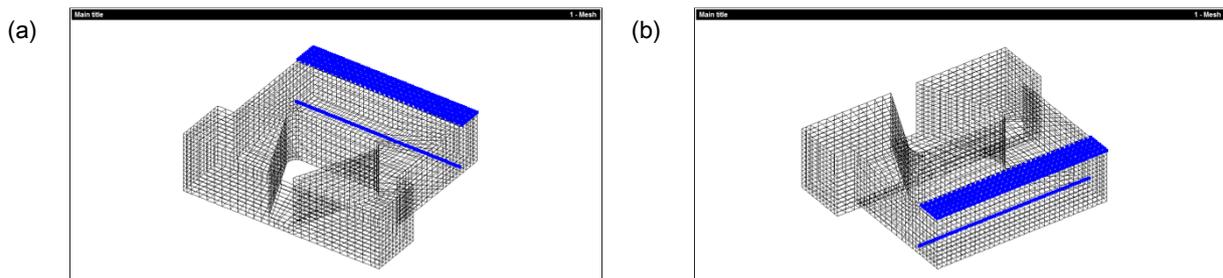


Figura 15 – Malha e condições de apoio do conjunto proposto.

(a) Perspectiva superior; (b) Perspectiva inferior.

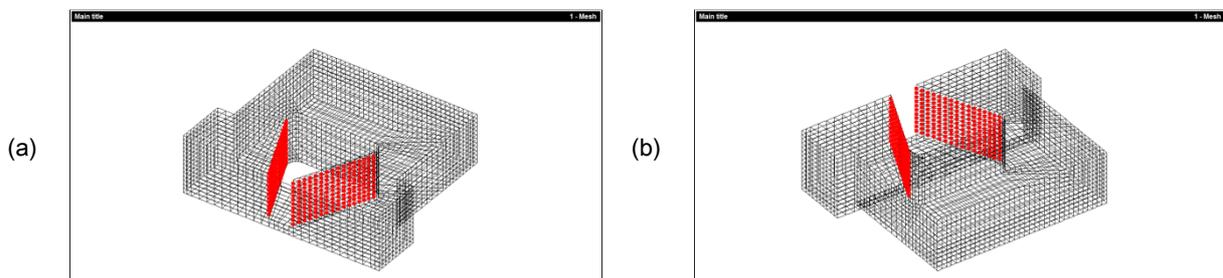


Figura 16 – Forças aplicadas do conjunto proposto.

(a) Perspectiva superior; (b) Perspectiva inferior.

## 2.2.2 DEFORMADA E TENSÕES INSTALADAS

A deformada obtida após aplicação das cargas é a apresentada na Figura 17. Como se pode verificar observando estas imagens, a peça adicionada confere uma estabilidade adicional à peça de ancoragem limitando a abertura das pinças e distribuindo mais uniformemente as tensões instaladas.

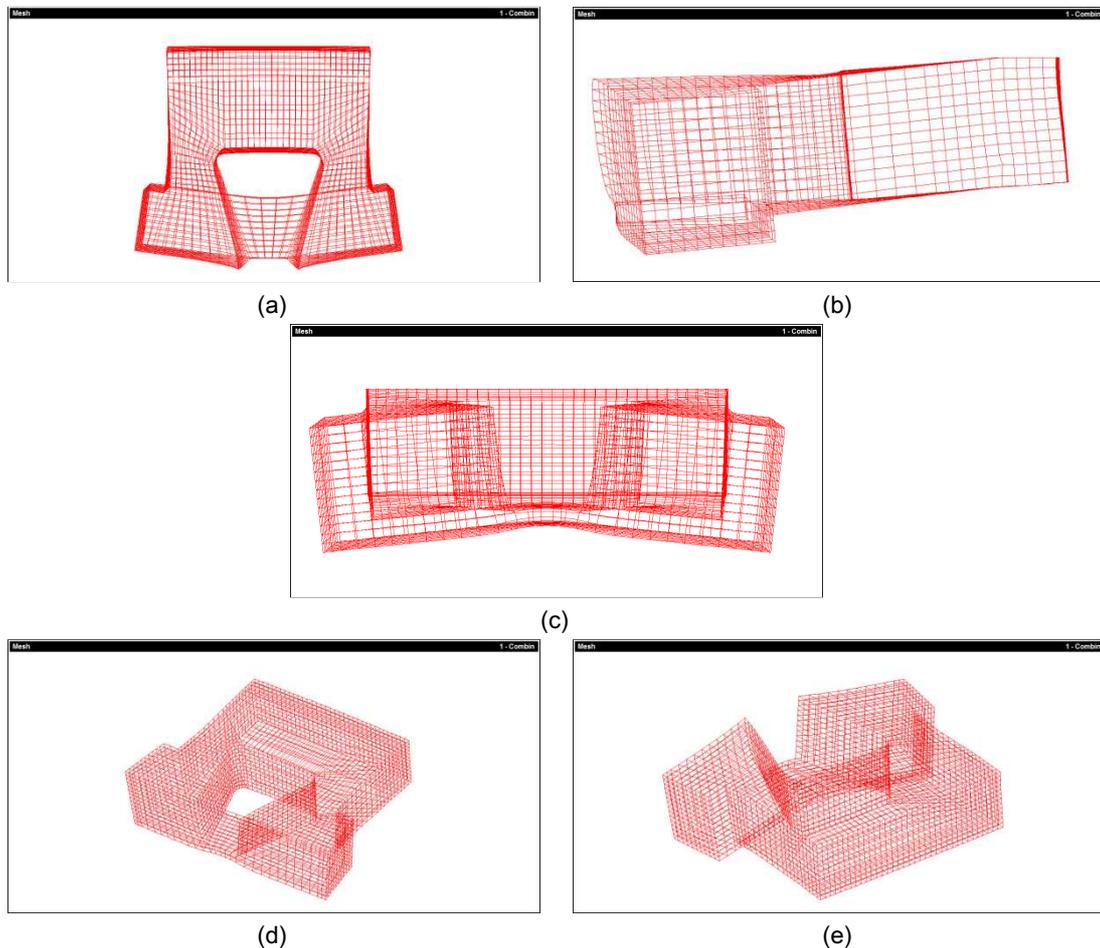


Figura 17 – Deformada do conjunto proposto (factor de escala = 100).

(a) Vista de topo ( $x_1x_2$ ); (b) Vista lateral ( $x_2x_3$ ); (c) Vista frontal ( $x_1x_3$ ); (d) Perspectiva superior; (e) Perspectiva inferior.

As tensões, segundo o eixo  $x_1$ , obtidas após a aplicação da força passam agora a ser as mais desfavoráveis e apresentam-se na Figura 18. Volta-se também a apresentar a distribuição das tensões  $\sigma_2$  na Figura 19.

Como se pode observar no (a) Perspectiva superior; (b) Perspectiva inferior.

Quadro 2, além das tensões superiores a 355 MPa segundo o eixo 2 existem agora na zona frontal, mais alguns pontos com tensão excessiva. Apresenta-se na Figura 20 a localização dos pontos com tensões instaladas (segundo os eixos coordenados) superiores a 355 MPa.

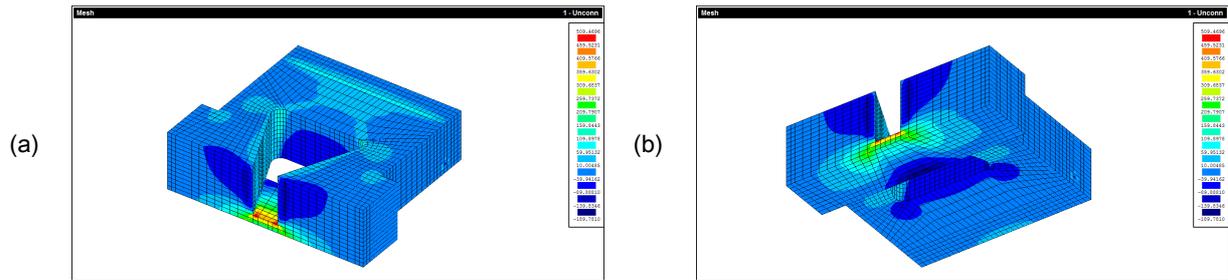


Figura 18 – Distribuição das tensões  $\sigma_1$  no conjunto proposto.

(a) Perspectiva superior; (b) Perspectiva inferior.

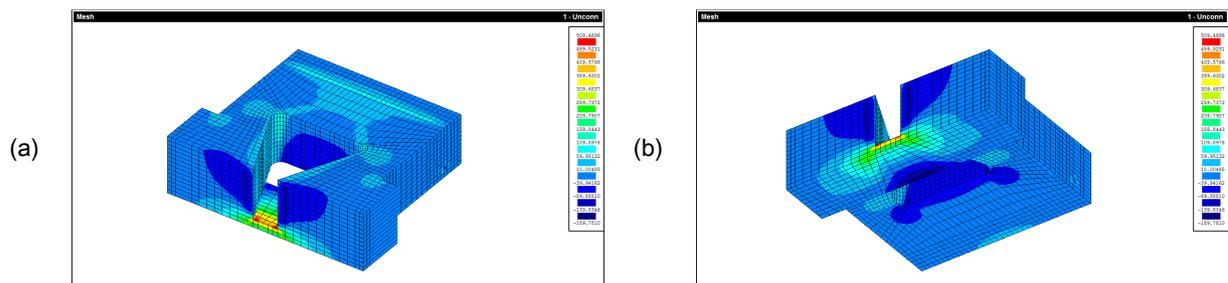


Figura 19 – Distribuição das tensões  $\sigma_2$  no conjunto proposto.

(a) Perspectiva superior; (b) Perspectiva inferior.

Quadro 2 – Tensões máximas instaladas no conjunto proposto.

Tensão	Tensão máxima de compressão	Tensão máxima de tracção
	[MPa]	[MPa]
$\sigma_1$	190	509
$\sigma_2$	259	451
$\sigma_3$	171	118
$\tau_{12}$	144	144
$\tau_{23}$	151	115
$\tau_{31}$	137	137

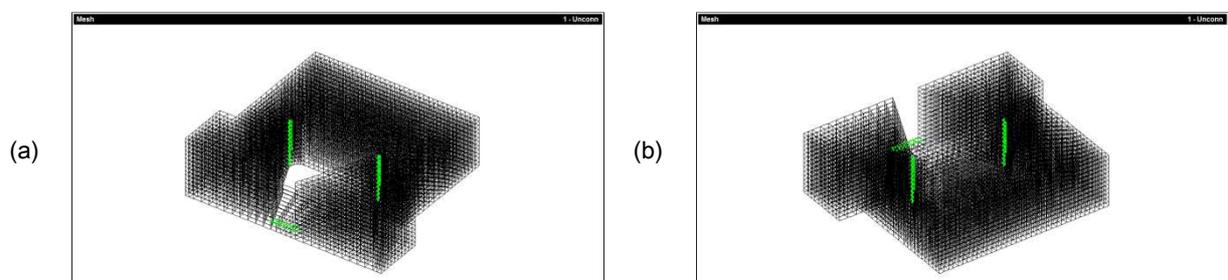


Figura 20 – Pontos do conjunto proposto com tensões superiores 355 MPa.

(a) Perspectiva superior; (b) Perspectiva inferior.

## 2.3 ANÁLISE DA PEÇA FINAL

De modo a limitar a deformação abertura a peça e diminuir as elevadas tensões existentes nas concordâncias das “pinças”, várias simulações numéricas foram efectuadas. Uma vez que a existência de uma plataforma estabilizadora revelou diminuir consideravelmente as tensões instaladas, optou-se por alterar a geometria da peça de modo a tornar essa plataforma parte da peça de ancoragem. Apresenta-se de seguida a análise da geometria final da peça, incluindo todos os seus detalhes de execução. Estes pormenores estão mostrados nas Figuras 21 e 22.

O material considerado foi novamente um aço com módulo de elasticidade ( $E$ ) de 200 GPa e um coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) de 0.3.

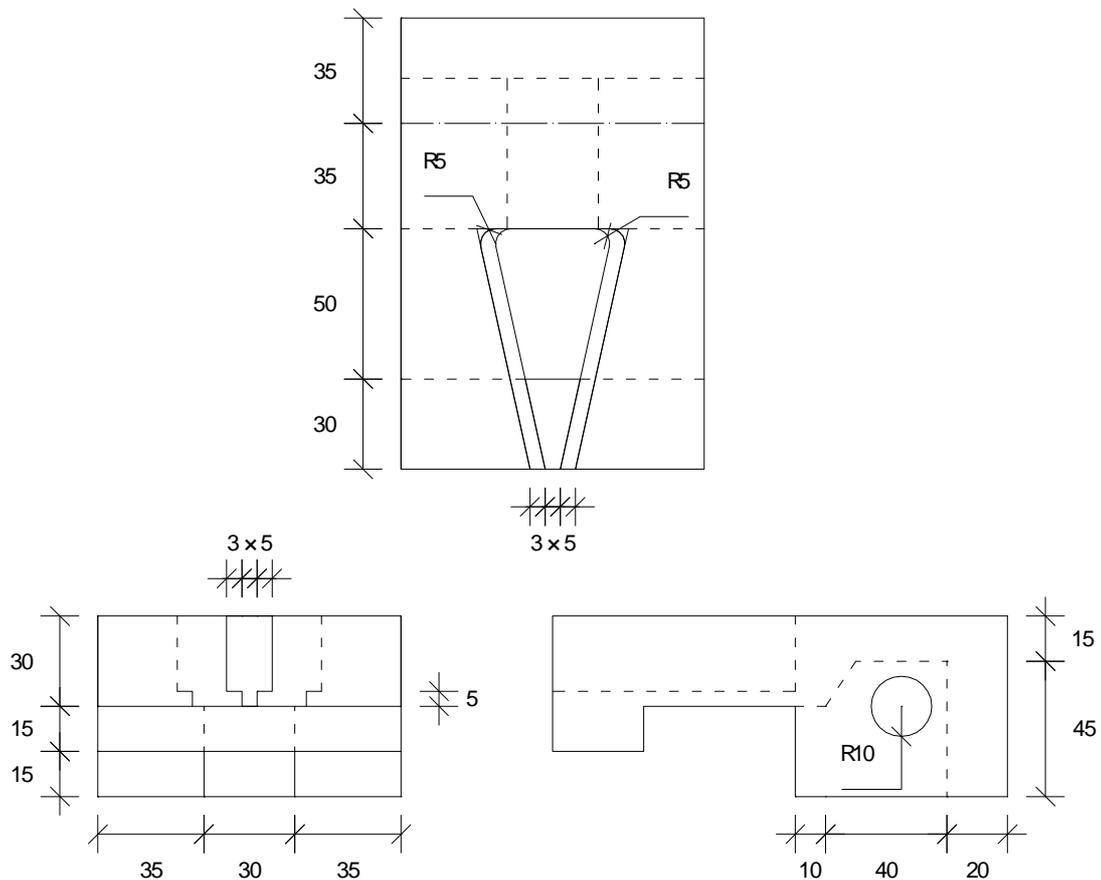


Figura 21 – Plantas e vistas da nova peça de ancoragem (Dimensões em mm).

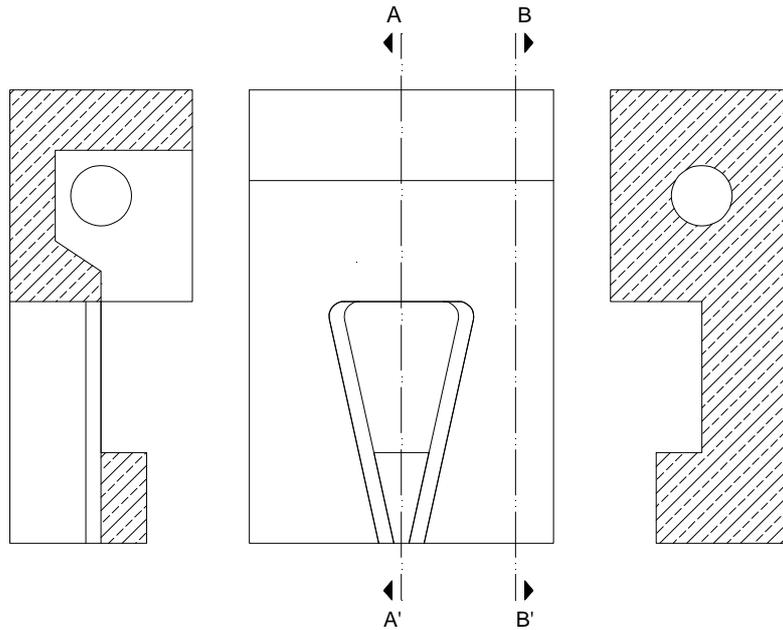


Figura 22 – Cortes da nova peça de ancoragem.

### 2.3.1 CONDIÇÕES DE APOIO

As condições de apoio (Figura 23) foram similares às consideradas anteriormente. Além de limitar os deslocamentos na parte superior, os restantes apoios foram agora colocados ao longo do veio de ligação com as barras telescópicas ( $\phi 20$  mm). A aplicação da carga foi também efectuada nos mesmos nós (Figura 24).

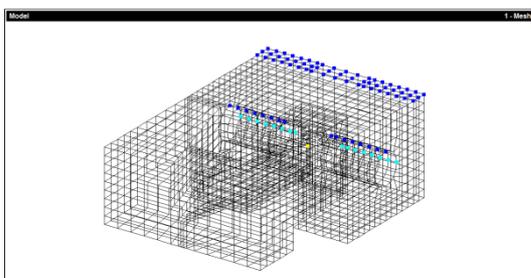


Figura 23 – Apoios da nova peça.  
(Azul -  $x_3$  impedido; Azul claro -  $x_2$  impedido)

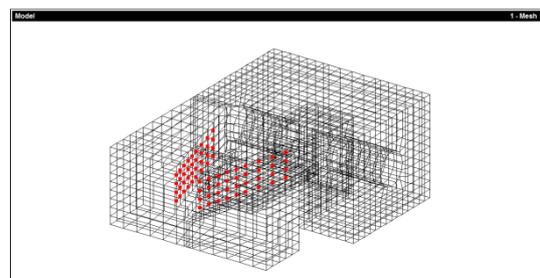


Figura 24 – Localização dos nós com forças aplicadas na nova peça.

Nesta modelação adoptaram-se elementos de volume com 8 nós, e utilizou-se para estes elementos integração  $2 \times 2 \times 2$ , de modo a tornar mais célere o processo de cálculo.

### 2.3.2 DEFORMADA E TENSÕES INSTALADAS

A deformada obtida apresenta-se na Figura 25. Apresentam-se duas perspectivas dessa mesma deformada.

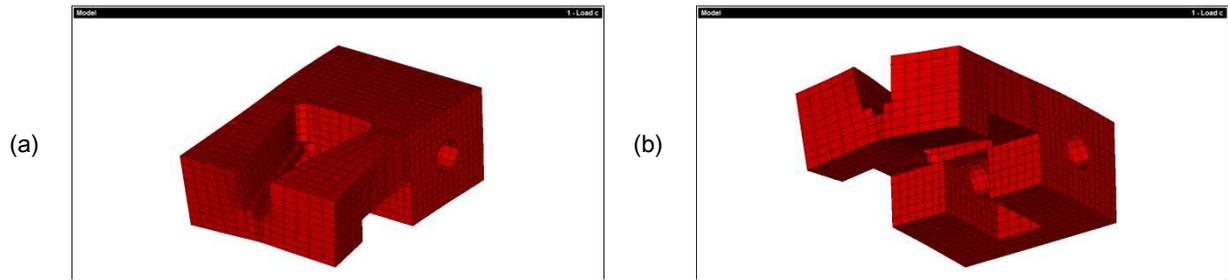


Figura 25 – Deformada da nova peça (factor de escala = 100).

(a) – Perspectiva superior; (b) – Perspectiva inferior.

O nível de tensão instalado demonstrou-se mais baixo ao nível dos pontos de integração (Quadro 3), mas a segurança da peça considera-se garantida dados os valores máximos das tensões de Von Mises<sup>2</sup> instaladas (346 MPa, tal como indicado na Figura 26).

Quadro 3 – Tensões máximas instaladas na nova peça.

Tensão	Tensão máxima de compressão	Tensão máxima de tracção
	[MPa]	[MPa]
$\sigma_1$	151	442
$\sigma_2$	294	290
$\sigma_3$	169	107
$\tau_{12}$	51	51
$\tau_{23}$	60	104
$\tau_{31}$	73	73

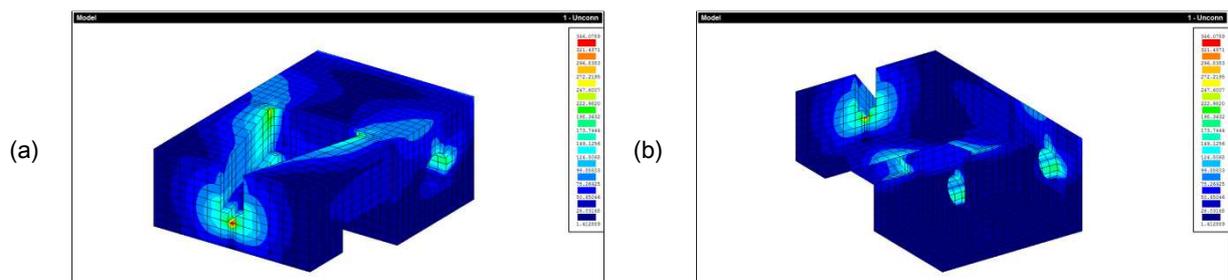


Figura 26 – Distribuição das tensões de Von Mises na nova peça.

(a) – Perspectiva superior; (b) – Perspectiva inferior.

$$^2 \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + \frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 3(\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{31}^2)}$$

### 3 DIMENSIONAMENTO DAS BARRAS PARA APLICAÇÃO DO PRÉ-ESFORÇO

De acordo com as reacções obtidas no contorno circular, a resultante força absorvida por esta zona da peça deverá ser próxima dos 100 kN.

O diâmetro mínimo dos pernos de ligação deverá portanto ser:

$$V_{Rd} = A_{corte} \times \frac{f_y}{\sqrt{3}}$$

Deveremos portanto assegurar sempre uma área de

$$\frac{100000}{2} = A_{corte} \times \frac{355}{\sqrt{3}} \Rightarrow A_{corte} \geq 244 \text{ mm}^2$$

Considerando uma secção circular,

$$\frac{\pi d^2}{4} = 244 \text{ mm}^2 \Rightarrow d \geq 17.6 \text{ mm}$$

Logo, o diâmetro escolhido para o orifício na peça é adequado ao esforço nele aplicado.

Esta dimensão é fundamental para definir as dimensões das barras biarticuladas a utilizar. Uma vez que o perno de ligação terá um diâmetro de 20 mm, as barras biarticuladas terão obrigatoriamente um diâmetro interno mínimo superior a 20 mm.

#### 3.1 ESCOLHA DO TUBO

De modo a obter uma razoável estimativa inicial da dimensão mínima do tubo necessário, deverá fazer-se a verificação da área (à compressão, ver Figura 27) necessária para suportar referidos 100 kN.

Sendo assim, deverá evitar-se o esmagamento das aberturas circulares ao longo do tubo. Para este efeito, deve-se verificar que a área ( $A$ ) suporta uma tensão de esmagamento inferior à resistência do aço a utilizar (355 MPa).

As características do material a utilizar são semelhantes às utilizadas no ponto anterior, ou seja,  $E = 200 \text{ GPa}$  e  $\nu = 0.3$ .

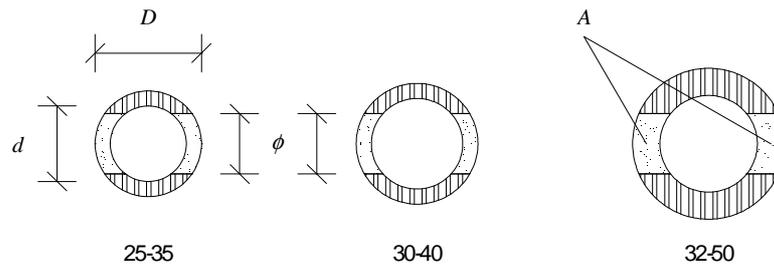


Figura 27 – Área do tubo telescópico.

Observando os resultados obtidos no Quadro 4, prevê-se que apenas a partir de um tubo do tipo 32–50 se poderá adoptar este sistema.

Quadro 4 – Área de diferentes dimensões de tubo.

Tipo de Tubo	$d$ [mm]	$D$ [mm]	$e$ [mm]	$\phi$ [mm]	$A$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$V$ [mm <sup>3</sup> ]	$P$ [kg/m]
25–35	25	35	5	20	220	78	439823	3.453
30–40	30	40	5	20	213	76	518362.8	4.069
32–50	32	50	9	20	377	134	1102699	8.656

$$\text{Obs.: } F_{max} = A \times f_y; V = \left( \pi \frac{D+d}{2} \times L - 2 \times \frac{L}{s} \times \pi \frac{\phi^2}{4} \right) \times e; P = V \times m_{aço}$$

$$f_y = 355 \text{ MPa}; L = 1000 \text{ mm}; s = 100 \text{ mm}; \phi = 20 \text{ mm}; m_{aço} = 7850 \text{ kg/m}^3$$

### 3.2 SUGESTÃO: TUBO 32–50

Uma vez que as dimensões indicam que um tubo tipo 32–50 será suficiente para a aplicação pretendida, procedeu-se à análise numérica do mesmo, aplicando-lhe uma carga axial de 100 kN.

A tensão máxima obtida num tubo com 2 metros de comprimento e furação de 10 em 10 cm foi de aproximadamente 315 MPa (ver Quadro 5). Os pontos onde se concentram as maiores tensões são, como seria previsível, na zona comprimida do perímetro das aberturas.

À semelhança da peça dimensionada no ponto anterior, analisaram-se também as tensões de Von Mises, tendo-se obtido como máximo de tensão o valor de 324 MPa (Figura 28). De acordo com esta tensão, estima-se que a carga de cedência desta peça ronde os 110 kN. Sendo assim, conclui-se que muito provavelmente esta será a mínima dimensão possível para este tubo. Ainda assim, poderá ainda procurar-se otimizar esta solução, mantendo esta espessura (9 mm), mas diminuindo os diâmetros interno e externo.

O máximo encurtamento registado nesta peça foi de aproximadamente 1.06 mm, coerente com o valor inicialmente estimado<sup>3</sup>, de 1.28 mm:

$$\Delta L = \frac{NL}{A'E}$$

onde  $N = 100000 \text{ N}$ ;  $L = 2000 \text{ mm}$ ;  $A' = 782 \text{ mm}^2$ ;  $E = 200000 \text{ MPa}$ .

Quadro 5 – Tensões máximas instaladas no tubo telescópico.

Tensão	Tensão máxima de compressão	Tensão máxima de tracção
	[MPa]	[MPa]
$\sigma_1$	82	97
$\sigma_2$	263	76
$\sigma_3$	315	43
$\tau_{12}$	41	41
$\tau_{23}$	132	135
$\tau_{31}$	29	29

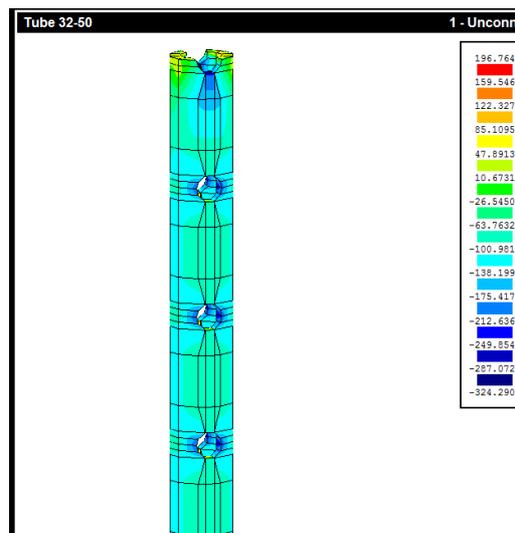


Figura 28 – Tensões de Von Mises no tubo telescópico.

<sup>3</sup> O encurtamento da peça é controlado pela maior secção transversal da peça:  $A' = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} - A$

## 4 MONTAGEM DO SISTEMA DE PRÉ-ESFORÇO

Apresenta-se na Figura 29 um esquema da ligação entre os diferentes componentes do sistema de pré-esforço. Observando esta Figura confirma-se que o sistema inicialmente idealizado é extremamente simples de montar e permitirá aplicar pré-tensão de forma rápida, simples e eficiente.

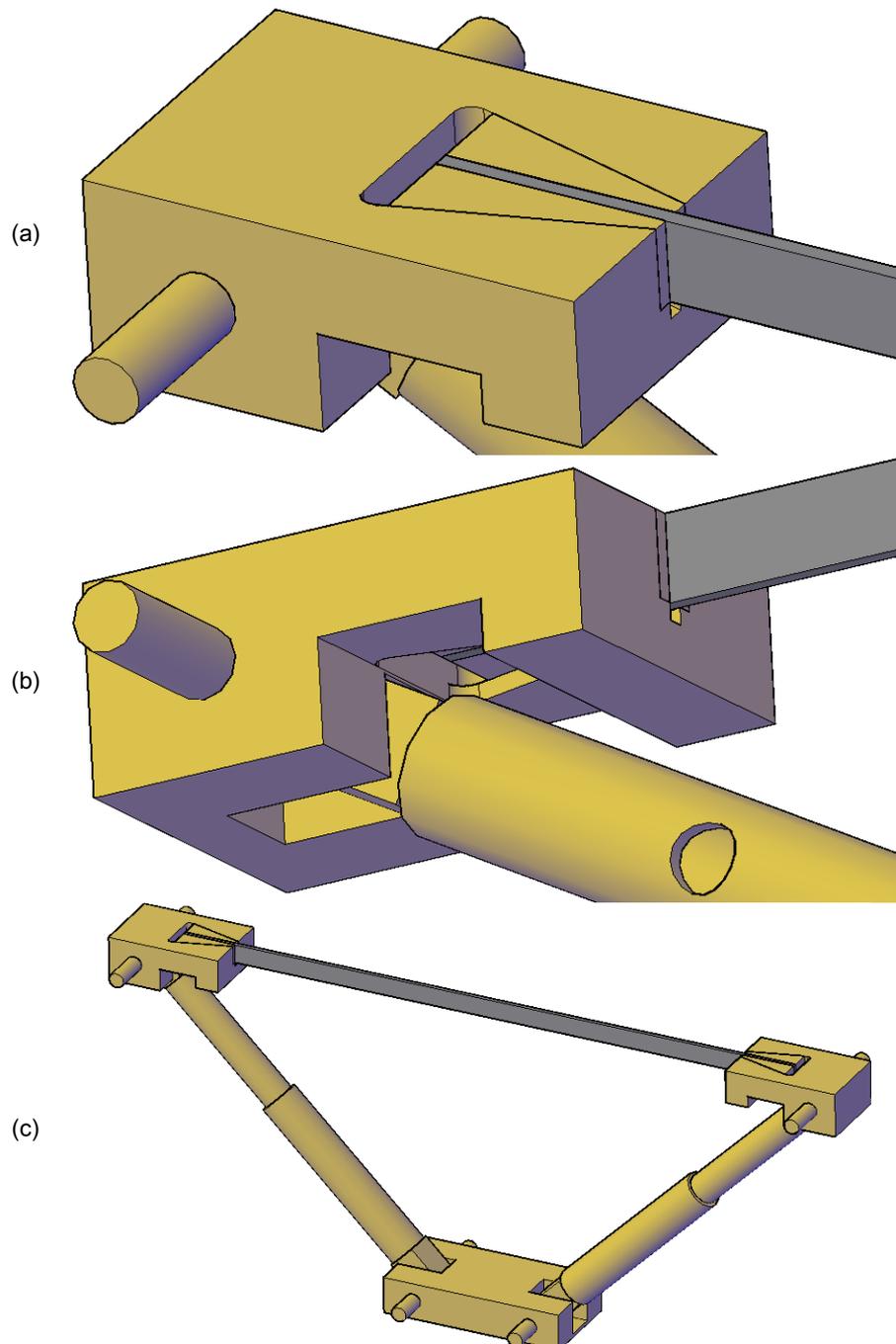


Figura 29 – Esquema do sistema de pré-esforço.



## 5 CONCLUSÕES

A realização deste trabalho permitiu concluir que o sistema de pré-esforço pretendido é exequível utilizando peças de dimensões reduzidas.

Deverão realizar-se cálculos adicionais de modo a assegurar a segurança dos restantes elementos do sistema embora se considere que a segurança dos restantes elementos está garantida desde que a área de contacto entre as peças seja sempre superior a  $N/\sigma$ , ou seja, 281.7 mm<sup>2</sup>.



## 6 AGRDECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito do programa de investigação "CUTINEMO" financiado pela FCT, PTDC/ECM/73099 / 2006. Os autores expressam o seu agradecimento às empresas S&P, Empreiteiros Casais e Artecanter. O primeiro autor manifesta também o seu agradecimento ao apoio financeiro concedido pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (SFRH/BD/61756/2009).