



## Avaliação numérica e experimental da carga admissível de vigas compostas para monocarris de sistemas de elevação

HUGO MIGUEL DIAS GOUVEIA

Outubro de 2015

Avaliação Numérica e Experimental da Carga  
Admissível em Apoios de Vigas Compostas para  
Monocarris de Sistemas de Elevação

Hugo Miguel Dias Gouveia

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica – Ramo Construções

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



15 de outubro de 2015





Relatório da Unidade Curricular de Dissertação/Projeto/Estágio do 2º ano do Mestrado em  
Engenharia Mecânica – Ramo Construções

Candidato: Hugo Gouveia, N° 1080823, 1080823@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Fernando José Ferreira, fjf@isep.ipp.pt

Empresa: VHN Engenharia, Lda.

Supervisão: Vítor Neves, info@vhntech.com

Mestrado em Engenharia Mecânica  
Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



15 de outubro de 2015



*À minha família...*





## *Agradecimentos*

Professor Fernando Ferreira, pelo incansável apoio, incentivo e esclarecimentos prestados durante este projeto.

Professor Vítor Neves, pelo apoio e por todo o material disponibilizado.

Engenheiro Vítor, pelo trabalho de maquinagem efetuado para a realização de acessórios de fixação indispensáveis ao ensaio.

Engenheiro Gustavo, pelo auxílio na instrumentação da viga.

Aos meus pais, por todo o apoio ao longo de toda a minha vida.

À minha irmã, pelo impacto que teve na minha educação ao longo dos anos.

Ana Lemos, por ser o catalisador da minha felicidade e a força que me motiva a fazer mais e melhor todos os dias.

A todos aqueles que não foram mencionados mas que tiveram impacto direto ou indireto na concretização deste projeto.



## *Resumo*

Este trabalho foi realizado com o apoio, e em colaboração da empresa *Flexcrane*, que constrói e comercializa soluções flexíveis de pontes rolantes para cargas ligeiras. Com cargas máximas de 2 toneladas estas pontes e seus caminhos de rolamento são construídas essencialmente enformados a frio.

O objetivo deste trabalho é a verificação numérica e experimental das cargas que este tipo de estrutura suporta, nas suas diferentes configurações.

Numa aproximação por engenharia inversa, com a realização deste trabalho, foi possível determinar a carga admissível das vigas compostas utilizadas, assim como o seu comportamento quando em carga.

Para obtenção destes resultados foram realizadas simulações computacionais recorrendo ao método de elementos finitos, utilizando para isso o *software Ansys Workbench* e ainda ensaios experimentais que permitiram validar os resultados obtidos numericamente e consolidar o conhecimento sobre o comportamento desta solução comercial.

Por ser de construção modular, são possíveis diferentes combinações para o produto final, por esta razão foram estudados numericamente diferentes configurações possíveis, com e sem reforços. Foi realizada a validação experimental para a configuração mais usual, fazendo recurso a um dispositivo para ensaio de estruturas e componentes, pertencente ao Isep. Foi ainda utilizada a técnica extensométrica para avaliar as tensões em pontos selecionados e compara-los com os obtidos numericamente.

Concluiu-se pelo ótimo desempenho dos produtos *Flexcrane*.

### *Palavras-Chave*

Ponte rolante, enformados a frio, vigas compostas, simulações numéricas, estruturas modulares, técnicas experimentais, extensometria.



## *Abstract*

This work was carried out with the support and collaboration of enterprise FLEX CRANE, who builds and sells flexible solutions of cranes for light loads. With maximum loads of 2 tones these cranes and their bearing paths are constructed in cold formed profiles.

The aim of this work is the numerical and experimental verification of the ultimate load that this type of structure supports, in its various configurations.

In a reverse engineering approach, with this work, it was possible to determine the permissible load of the compose beams and your behavior when under load. To obtain these results were performed theoretical calculations based on mechanics of materials, computer simulations using the finite element method using Ansys Workbench software and experimental tests to validate the numerical results and consolidate the knowledge about the behavior of this solution.

Because is used a modular construction, different combinations are possible for the final product. For this reason it was numerically stud different possible configuration, with and without reinforcements. Experimental validation was performed for the most usual configuration, making use of a device for testing of structures and components in ISEP. It was also used the strain gauge technique to assess stress in selected points and compares them with those obtained numerically.

It was concluded by the great performance of *Flexcrane* products.

### ***Keywords***

Cranes, cold formed profiles, compose beams, numerical simulation, modular construction, strain gauge;



# Índice

|   |             |
|---|-------------|
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....   | <b>I</b>    |
| <b>RESUMO</b> .....   | <b>III</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | <b>V</b>    |
| <b>ÍNDICE</b> .....   | <b>VII</b>  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....  | <b>IX</b>   |
| <b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....  | <b>XIII</b> |
| <b>NOMENCLATURA</b> .....   | <b>XVII</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>1</b>    |
| 1.1. EMPRESA – FLEXCRANE .....  | 2           |
| <b>2. PERFIS E DIMENSÕES</b> .....  | <b>7</b>    |
| 2.1. SECÇÕES .....  | 7           |
| 2.2. MOMENTO DE INERCIA .....   | 9           |
| 2.2.1. Momento de inercia reforço .....   | 9           |
| 2.2.2. Momento de inercia dos perfis laterais .....   | 10          |
| 2.2.3. Momento de inercia da viga composta .....  | 11          |
| 2.3. LIGAÇÕES ENTRE ELEMENTOS .....   | 12          |
| <b>3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS VIGAS FLEXCRANE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS</b> ..... | <b>14</b>   |
| 3.1. INTRODUÇÃO .....   | 14          |
| 3.2. CONFIGURAÇÕES ANALISADAS .....   | 14          |
| 3.2.1. Configuração I .....   | 15          |
| 3.2.2. Configuração II .....  | 15          |
| 3.2.3. Configuração III .....   | 16          |
| 3.2.4. Configuração IV .....  | 17          |
| 3.3. SIMULAÇÕES .....   | 17          |
| 3.3.1. Aplicativo utilizado .....   | 18          |
| 3.3.2. Primeira abordagem às simulações .....   | 18          |
| 3.3.3. Tipo de elemento .....   | 24          |
| 3.4. RESULTADOS .....   | 26          |
| 3.4.1. Análise Configuração I .....   | 26          |
| 3.4.2. Análise Configuração II .....  | 33          |
| 3.4.3. Análise Configuração III .....   | 37          |
| <b>4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS</b> .....   | <b>45</b>   |

|   |                                      |           |
|---|--------------------------------------|-----------|
| 4.1.                                      | ESTRUTURA DE ENSAIO .....            | 45        |
| 4.2.                                      | ACESSÓRIOS FLEXCRANE ENSAIADOS ..... | 47        |
| 4.3.                                      | EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....        | 48        |
| 4.4.                                      | INSTRUMENTAÇÃO DA VIGA .....         | 51        |
| 4.5.                                      | ESQUEMA DE MONTAGEM DO ENSAIO.....   | 54        |
| 4.6.                                      | REGISTO DE RESULTADOS.....           | 55        |
| <b>5.</b>                                 | <b>ANÁLISE DE RESULTADOS.....</b>    | <b>58</b> |
| 5.1.                                      | DESLOCAMENTOS VERTICAIS.....         | 58        |
| 5.2.                                      | TENSÕES DIRECIONAIS.....             | 59        |
| <b>6.</b>                                 | <b>CONCLUSÕES .....</b>              | <b>62</b> |
| 6.1.                                      | TRABALHOS FUTUROS .....              | 63        |
| <b>ANEXO A. ESTRUTURA DE ENSAIO .....</b> |                                      | <b>64</b> |
| <b>ANEXO B. DESENHOS TÉCNICOS .....</b>   |                                      | <b>67</b> |

## *Índice de Figuras*

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figura 1  | Perfis Flexcrane.....   | 2  |
| Figura 2  | Gruas rotativas.....  | 2  |
| Figura 3  | Perfis curvos.....  | 3  |
| Figura 4  | Viga Flexcrane.....   | 3  |
| Figura 5  | Viga Flexcrane.....   | 4  |
| Figura 6  | Viga Flexcrane.....   | 4  |
| Figura 7  | Viga Flexcrane.....   | 5  |
| Figura 8  | Viga Flexcrane.....   | 5  |
| Figura 9  | Viga Flexcrane.....   | 6  |
| Figura 10 | Secção da viga Flexcrane.....   | 8  |
| Figura 11 | Secção do perfil lateral cotado.....  | 8  |
| Figura 12 | Secção do reforço cotado.....   | 9  |
| Figura 13 | Secção dos reforços.....  | 9  |
| Figura 14 | Secção dos perfis laterais.....   | 10 |
| Figura 15 | Secção da viga composta.....  | 11 |
| Figura 16 | Ligação entre chapas laterias.....  | 12 |
| Figura 17 | Ligação entre chapas laterias e reforços.....                                   | 13 |
| Figura 18 | Configuração I (Vista Explodida).....   | 15 |
| Figura 19 | Configuração II (Vista explodida).....  | 16 |
| Figura 20 | Configuração II (Vista explodida).....  | 16 |
| Figura 21 | Configuração IV (Vista explodida).....  | 17 |
| Figura 22 | Elemento pré estabelecido pelo software.....                                    | 19 |
| Figura 23 | Malha definida pelo software.....   | 19 |
| Figura 24 | Refinamento na zona de contacto.....  | 20 |
| Figura 25 | Condições de apoio.....   | 21 |
| Figura 26 | Cargas aplicadas.....   | 21 |
| Figura 27 | Tensão equivalente [Mpa].....   | 22 |
| Figura 28 | Deslocamentos totais [mm].....  | 22 |
| Figura 29 | Flexão desviada.....  | 23 |
| Figura 30 | Modelação com espessura nula e modelação com espessura definida pela malha..... | 25 |
| Figura 31 | Elemento de malha.....  | 25 |
| Figura 32 | Condições de apoio (Configuração I).....  | 26 |
| Figura 33 | Carga imposta – Eixo xx (s) Eixo yy (N).....                                    | 27 |
| Figura 34 | Carga imposta (Configuração I).....   | 27 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figura 35 | Fixação entre as chapas laterais (Configuração I) .....                       | 28 |
| Figura 36 | Malha aplicada (Configuração I).....  | 29 |
| Figura 37 | Gráfico de convergência da força.....   | 29 |
| Figura 38 | Gráfico de convergência do deslocamento.....                                  | 30 |
| Figura 39 | Deslocamentos totais (mm) .....   | 30 |
| Figura 40 | Tensão equivalente – Von Mises (MPa) .....                                    | 31 |
| Figura 41 | Tensão equivalente – Von Mises - Localizada (Mpa).....                        | 32 |
| Figura 42 | Tensão equivalente – Von Mises - Localizada (MPa).....                        | 32 |
| Figura 43 | Condições de apoio (configuração II) .....                                    | 33 |
| Figura 44 | Cargas aplicadas (configuração II).....                                       | 34 |
| Figura 45 | – Malha aplicada (configuração II) .....                                      | 34 |
| Figura 46 | Ligação entre chapas laterais e reforços (configuração II).....               | 35 |
| Figura 47 | Deslocamentos totais (mm) .....   | 36 |
| Figura 48 | Carga Vs Deslocamentos.....   | 36 |
| Figura 49 | Tensão equivalente – Von Mises (MPa) .....                                    | 37 |
| Figura 50 | Tensão equivalente – Von Mises nos reforços (MPa).....                        | 37 |
| Figura 51 | Condições de apoio .....  | 38 |
| Figura 52 | Ligações entre elementos .....  | 39 |
| Figura 53 | Zona definida para contacto. ....   | 40 |
| Figura 54 | Deslocamento imposto .....  | 40 |
| Figura 55 | Malha aplicada .....  | 41 |
| Figura 56 | Deslocamentos totais.....   | 42 |
| Figura 57 | Tensões equivalentes (Von Mises).....   | 43 |
| Figura 58 | Tensões equivalente máxima.....   | 43 |
| Figura 59 | Tensões equivalentes na área envolvente dos apoios .....                      | 44 |
| Figura 60 | Tensões equivalentes nos reforços .....                                       | 44 |
| Figura 61 | Estrutura de ensaio .....   | 46 |
| Figura 62 | Viga Flexcrane .....  | 47 |
| Figura 63 | Apoio Flexcrane .....   | 47 |
| Figura 64 | Carro Flexcrane .....   | 48 |
| Figura 65 | Célula de carga HBM .....   | 48 |
| Figura 66 | Cilindro de carga e bomba Larzep.....   | 49 |
| Figura 67 | Peças construídas na oficina.....   | 49 |
| Figura 68 | – Sensor de deslocamento linear .....   | 50 |
| Figura 69 | – Sensor de deslocamento linear .....   | 50 |
| Figura 70 | – Equipamento Vishay P3 .....   | 51 |
| Figura 71 | Representação esquemática do local de colagem dos extensómetros 1, 2 e 3..... | 52 |
| Figura 72 | Representação esquemática do local de colagem dos extensómetros 3 e 4.....    | 52 |
| Figura 73 | Representação esquemática do local de colagem do extensómetro 5.....          | 53 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 74 | Extensómetro 2, colado na alma da viga.....                    | 53 |
| Figura 75 | Extensómetro 1, colado no banzo superior da viga.....          | 54 |
| Figura 76 | Extensómetro 5, colado junto ao furo de fixação ao apoio ..... | 54 |
| Figura 77 | – Esquema de montagem.....                                     | 55 |
| Figura 78 | – Deslocamentos verticais .....                                | 58 |
| Figura 79 | – Tensões ensaio experimental Vs Simulação.....                | 59 |
| Figura 80 | – Tensões ensaio experimental Vs Simulação.....                | 60 |
| Figura 81 | – Tensões ensaio experimental Vs Simulação.....                | 60 |
| Figura 82 | – Tensões ensaio experimental Vs Simulação.....                | 61 |
| Figura 83 | – Tensões ensaio experimental Vs Simulação.....                | 61 |
| Figura 84 | Figura célula de carga HBM .....                               | 64 |
| Figura 85 | Figura cilindro de carga Larzep.....                           | 64 |
| Figura 86 | Conjunto para ensaio.....                                      | 65 |



## *Índice de Tabelas*

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Comparação perfis.....                 | 12 |
| Tabela 2 – Dados de calibração.....               | 50 |
| Tabela 3 – Resultados primeiro carregamento ..... | 55 |
| Tabela 4 – Resultados segundo carregamento .....  | 56 |
| Tabela 5 – Resultados terceiro carregamento.....  | 57 |







## *Nomenclatura*

### **Caracteres Romanos**

$A$  – Área

$F$  – Força

$E$  – Módulo de *Young*

$l$  – Deslocamento

$F$  – Força

$\Delta t$  – Intervalo de tempo

### **Caracteres Gregos**

$\sigma$  – Tensão

$\sigma_r$  – Tensão real

$\sigma_c$  – Tensão de cedência

$\varepsilon$  – Deformação



# 1. Introdução

Este trabalho foi realizado com o apoio, e em colaboração da empresa *Flexcrane*, que constrói e comercializa soluções flexíveis de pontes rolantes para cargas ligeiras. Com cargas máximas de 2 toneladas estas pontes e seus caminhos de rolamento são construídas essencialmente enformados a frio.

Numa aproximação por engenharia inversa, o objetivo deste trabalho é a verificação numérica e experimental das cargas últimas que este tipo de estrutura suporta, nas suas diferentes configurações. Com a realização deste trabalho, foi também possível avaliar a carga admissível das vigas compostas utilizadas, assim como o seu comportamento quando em carga, nomeadamente o tipo de deformada que apresenta.

## 1.1. Empresa – Flexcrane

A empresa *Flexcrane*, pareceria norte-americana da VHN Engenharia, é especializada em sistemas de movimentação de cargas ligeiras, recorrendo para isso a elementos pré fabricados. Tendo como principal conceito a construção modular, esta apresenta soluções flexíveis às variadas solicitações industriais. Este tipo de elementos, devidamente selecionados, permite obter guias rotativas, guias bi-viga e mono carris.

Com um número de elementos reduzido é capaz de configurar as estruturas de acordo com as cargas necessárias, que variam de uma forma geral entre os 125 kg e os 2000 kg.

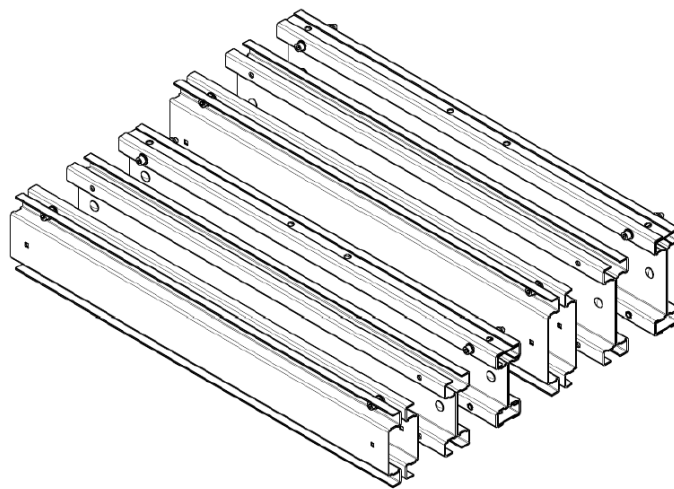


Figura 1 Perfis Flexcrane

As guias rotativas, sendo estruturas leves e de fácil manuseamento permitem elevar cargas entre os 125 Kg e os 800 Kg atingindo comprimentos máximos de lança na ordem dos 4 metros, Figura 2.

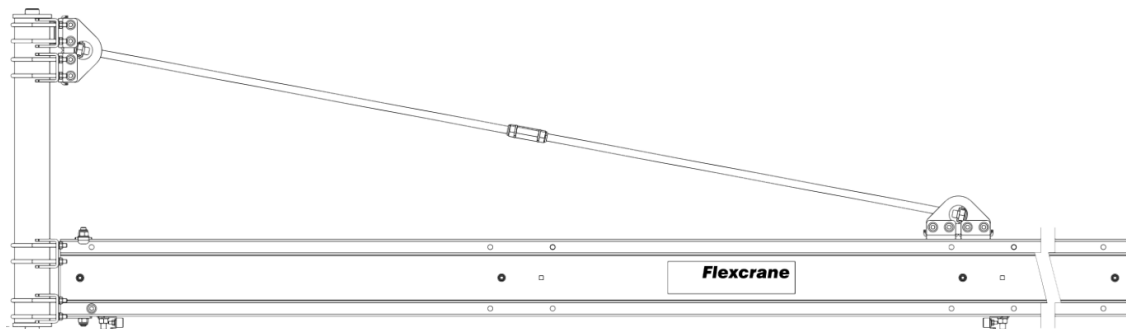
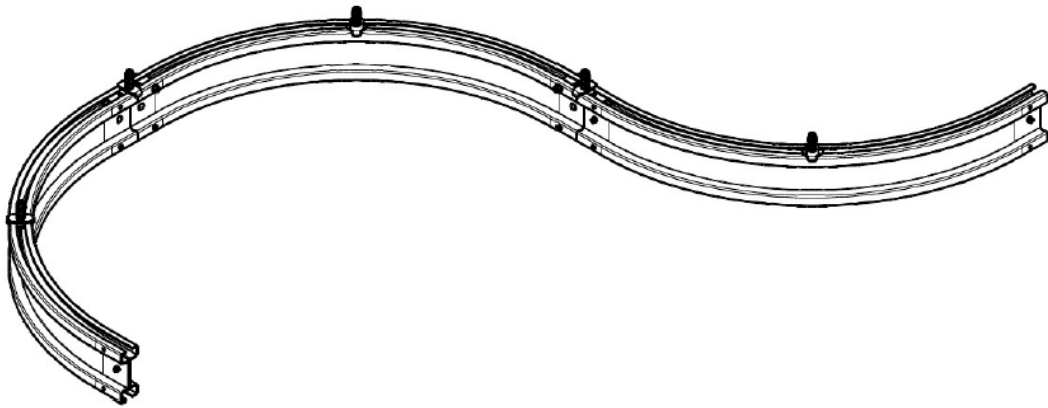


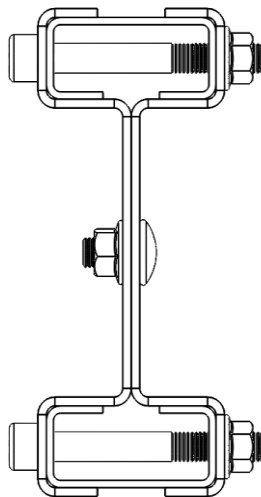
Figura 2 Guas rotativas

Não sendo apenas destinado a sistemas lineares, a *Flexcrane* disponibiliza também elementos curvos que permitem acompanhar de uma forma fácil as mais variadas formas das linhas de produção ou situações em que possam trabalhar, como se pode verificar na Figura 3.



**Figura 3 Perfis curvos**

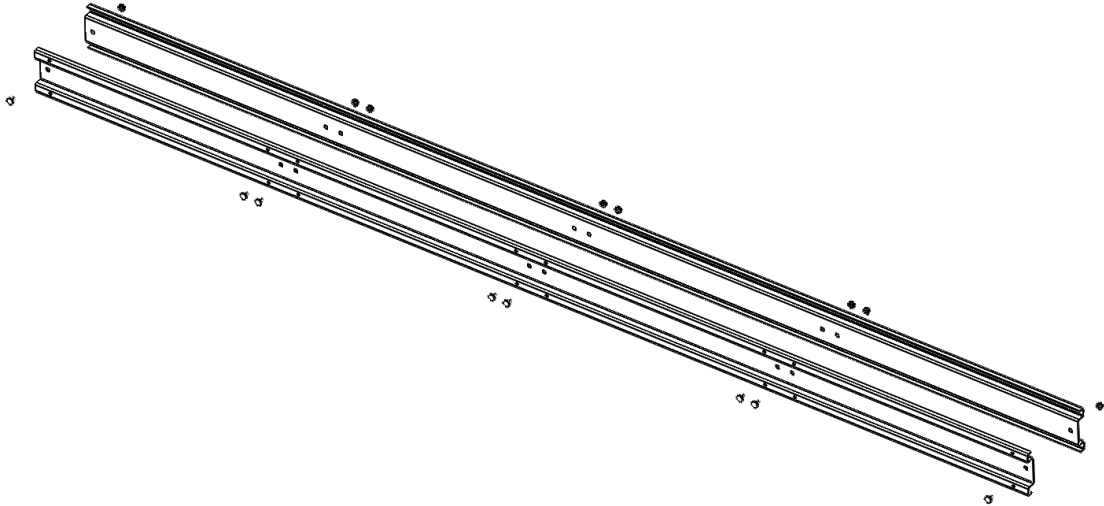
O produto em estudo neste trabalho, é um mono carril composto por dois elementos distintos, as chapas laterais e os reforços que quando unidos entre si, através de ligações aparafusadas, criam um perfil único, como mostra a figura a baixo.



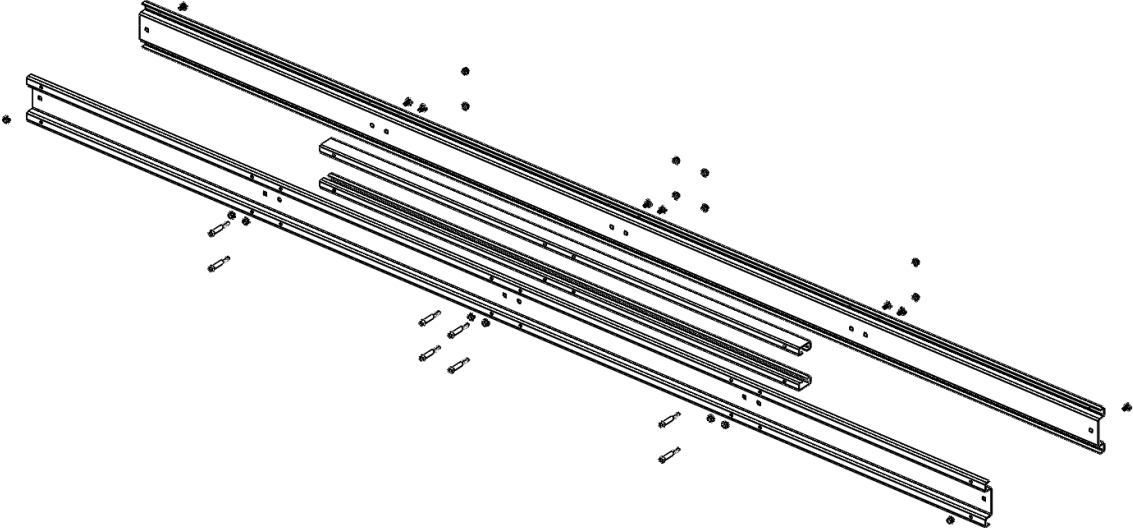
**Figura 4 Viga Flexcrane**

Estes perfis, em situações de funcionamento real, podem utilizar-se até 4 metros de vão, graças às várias configurações de montagem dos elementos constituintes da viga. Como representado na Figura 1 os perfis laterais podem ser montados formando um I ou

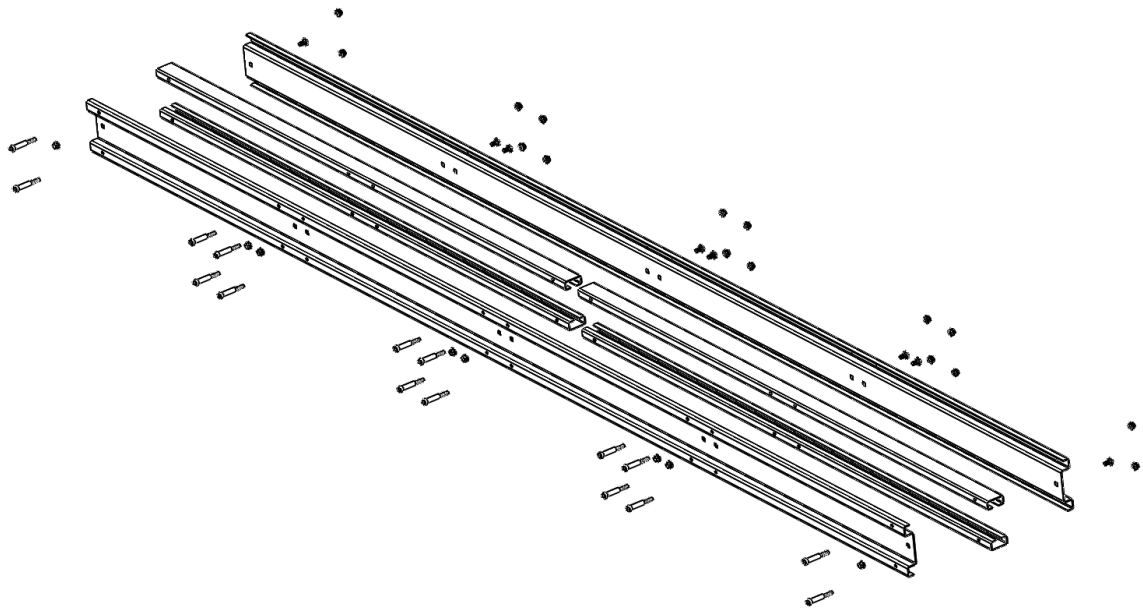
formando um perfil caixão, podem ainda no caso da montagem em I, estar munidos de reforços ou não. De seguida apresentam-se as configurações em I mais utilizadas que foram alvo de estudo.



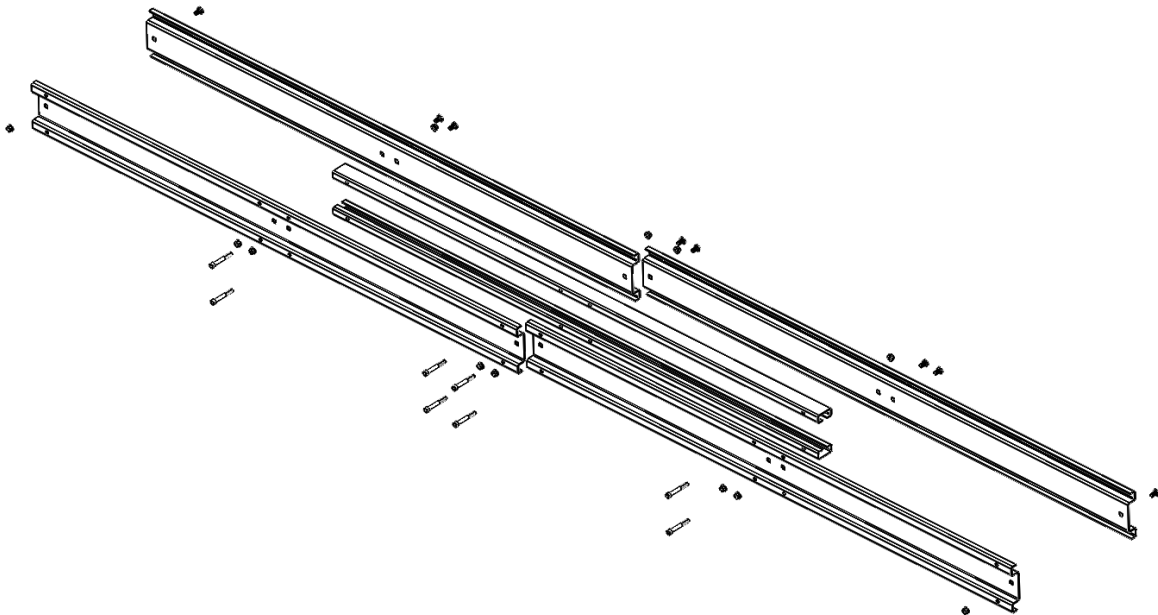
**Figura 5 Viga Flexcrane**



**Figura 6 Viga Flexcrane**

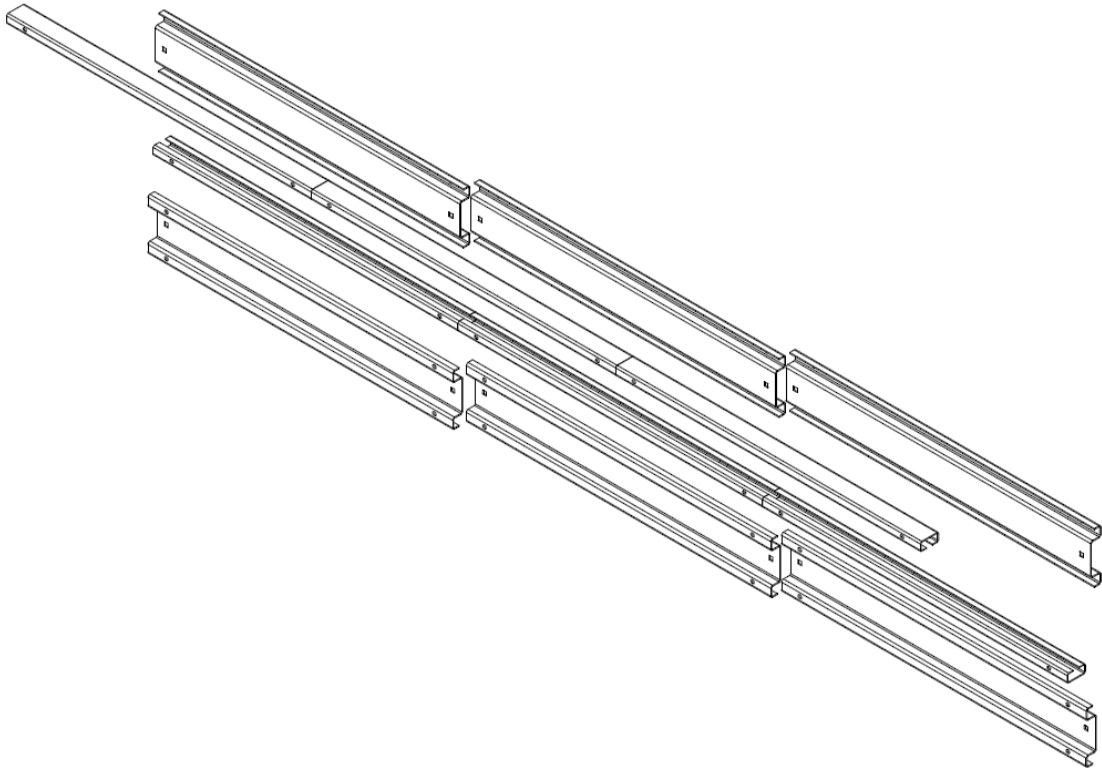


**Figura 7 Viga Flexcrane**



**Figura 8 Viga Flexcrane**

O tipo de montagem abaixo apresentado foi descontinuada por apresentar flexão desviada, como se poderá observar no capítulo 4.3.2. Não tendo qualquer problema funcional havia uma má aceitação dos clientes neste tipo de deslocamento fora do plano. Já o deslocamento no plano, de uma forma geral, é bem aceite pelos clientes.



**Figura 9 Viga Flexcrane**

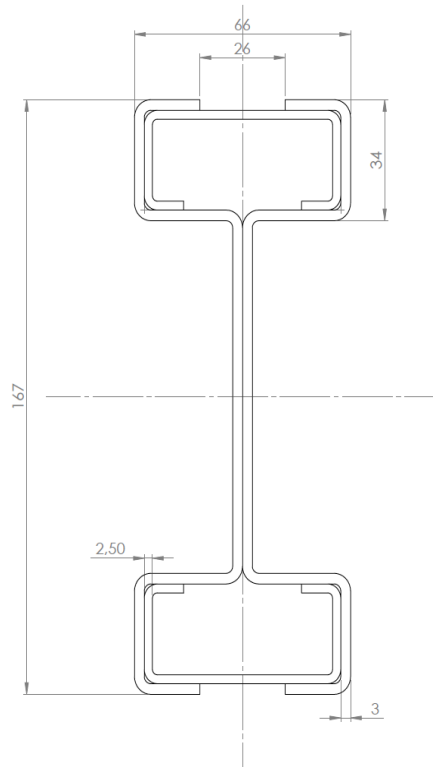
Como já foi referido a empresa comercializa estes produtos com uma boa implantação no mercado e com um bom sucesso. Apesar de o produto estar consolidado e ter sido alvo de dimensionamento por parte da empresa que o comercializa, surgiu a proposta de numa aproximação por engenharia inversa, realizar verificação numérica e experimental deste produto.

## 2. Perfis e Dimensões

Neste capítulo foi realizado um estudo dimensional dos principais elementos constituintes da viga *Flexcrane*, assim como o cálculo do momento de inercia, relativamente aos principais eixos de rotação, das várias secções.

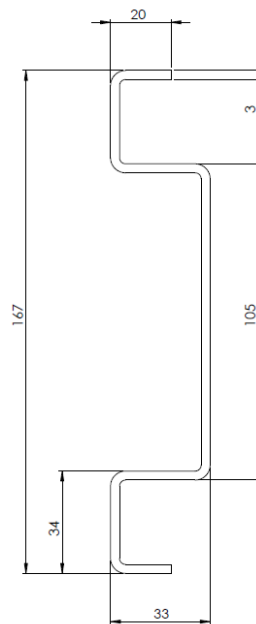
### 2.1. Secções

A viga *Flexcrane* é constituída por dois elementos estruturais distintos, denominados por perfil lateral e reforço. Assim sendo, e utilizando como ferramenta o *software Solidworks*, foi possível realizar a modelação dos dois elementos para obtenção dos respetivos desenhos.



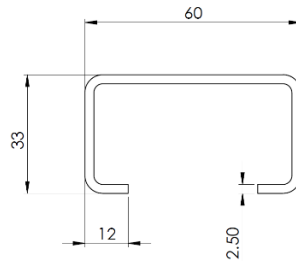
**Figura 10** Seção da viga Flexcrane

O perfil lateral, Figura 11, é o elemento estrutural de maior envergadura e que fornece a integridade à viga.



**Figura 11** Seção do perfil lateral cotado

O reforço quando montado em conjunto com os perfis laterais permite obter uma maior rigidez da viga. Em determinadas configurações de montagem também é utilizado como elemento de ligação, ou seja, é este reforço que permite a continuidade das vigas.

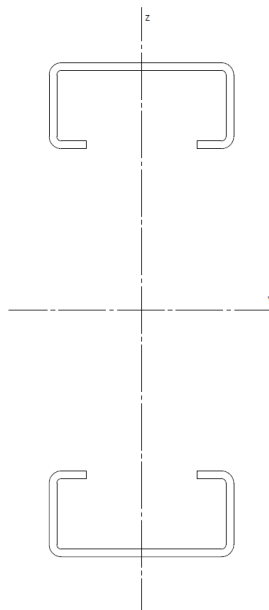


**Figura 12** Secção do reforço cotado

## 2.2. Momento de Inercia

Nesta fase será calculado o contributo de todos os elementos para o momento de inercia da secção da viga relativamente aos principais eixos de rotação.

### 2.2.1. Momento de inercia reforço



**Figura 13** Secção dos reforços

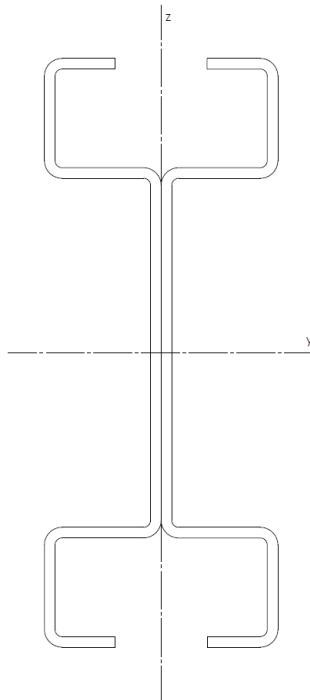
Utilizou-se o *Solidworks* como ferramenta para obtenção do momento de inercia dos reforços relativamente aos principais eixos de rotação, obtendo-se os seguintes resultados:

$$I_y = 314,969 \text{ cm}^4$$

$$I_z = 33,035 \text{ cm}^4$$

$$A = 6,26 \text{ cm}^4$$

### 2.2.2. Momento de inercia dos perfis laterais



**Figura 14** Seção dos perfis laterais

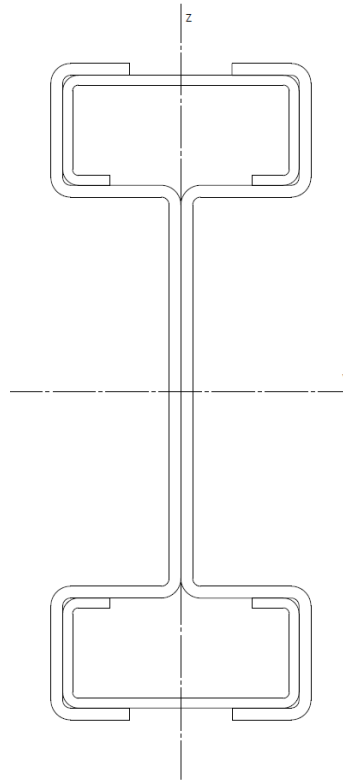
Utilizando o mesmo processo que foi utilizado para determinar os momentos de inércia dos reforços, obteve-se os seguintes resultados para as chapas laterais:

$$I_y = 441,976 \text{ cm}^4$$

$$I_z = 57,646 \text{ cm}^4$$

$$A = 15,11 \text{ cm}^4$$

### 2.2.3. Momento de inercia da viga composta



**Figura 15** Seção da viga composta

Realizando a soma do momento de inércia dos vários elementos constituintes da viga, obtemos o momento de inercia da viga composta:

$$I_y = 756,944 \text{ cm}^4$$

$$I_z = 90,682 \text{ cm}^4$$

$$A = 21,38 \text{ cm}^2$$

Organizando toda a informação relativamente aos momentos de inércia, áreas das secções e massas dos elementos podemos perceber qual o contributo de cada um para a rigidez da viga assim como compara-la com vigas comuns utilizadas normalmente neste tipo de estruturas:

**Tabela 1 – Comparação perfis**

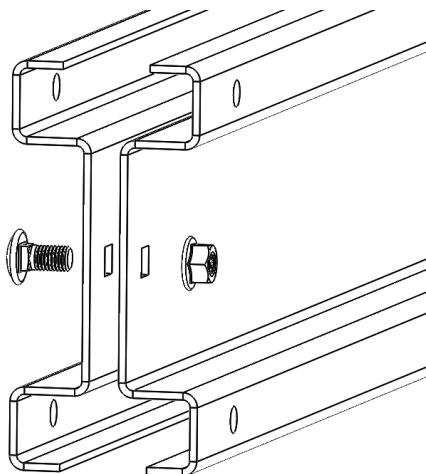
|          | Área Secção<br>[cm <sup>2</sup> ] | Iy [cm <sup>4</sup> ] | Iz [cm <sup>4</sup> ] | Massa<br>[Kg/m] |
|----------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|
| Reforços | 6,264                             | 314,969               | 33,035                | 5,358           |
| Laterais | 15,119                            | 441,976               | 57,646                | 11,584          |
| Viga     | 21,383                            | 756,944               | 90,682                | 16,942          |
| IPE 160  | 20,09                             | 869,30                | 68,31                 | 15,8            |
| HEA 120  | 25,34                             | 606,20                | 230,9                 | 19,9            |
| HEA 140  | 31,42                             | 1033,0                | 389,3                 | 24,7            |
| HEB 120  | 34,01                             | 864,4                 | 317,5                 | 26,7            |

Tendo por base a tabela 1, pode-se fazer uma comparação da viga *Flexcrane* com os perfis mais usuais neste tipo de estruturas. Salienta-se a proximidade de momentos de inercia, área da secção e massa entre a viga *Flexcrane* e o perfil IPE 160.

### 2.3. Ligações entre elementos

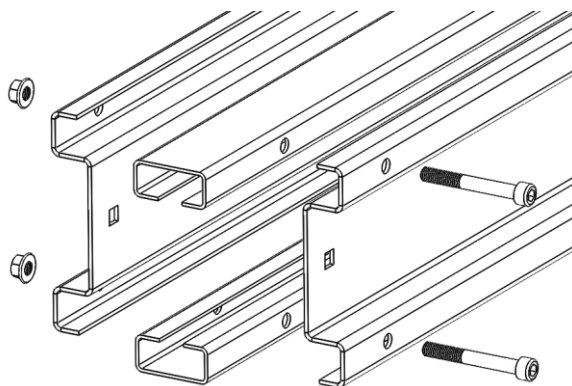
Os elementos estruturais constituintes da viga *Flexcrane* são ligados entre si através de ligações aparafusadas permitindo assim uma montagem fácil e rápida.

Na figura seguinte pode ser observada a ligação entre os dois perfis laterais, feita através de um parafuso M8 com cabeça de embeber arreigada quadrada de modo a facilitar o aperto com a porca.



**Figura 16** Ligação entre chapas laterais

Os reforços são unidos às chapas laterais através de parafusos M8 de cabeça cilíndrica de oco hexagonal que atravessam os três elementos, como se pode verificar na Figura 17.



**Figura 17** Ligação entre chapas laterais e reforços

# 3. Avaliação do desempenho das vigas *Flexcrane* pelo método dos elementos finitos

## 3.1. Introdução

A análise numérica de determinado objeto ou estrutura permite de forma fácil e num período de tempo relativamente curto obter possíveis comportamentos dos elementos em estudo quando solicitados. Facilmente se obtém também valores de deslocamentos, deformações, tensões entre vários outros resultados, possibilitando a realização de várias configurações sem ter de recorrer a testes experimentais e não envolvendo portanto quaisquer custos adicionais.

Por estes motivos a utilização destes métodos de cálculo são atualmente largamente utilizados nas mais variadas áreas de engenharia.

## 3.2. Configurações analisadas

Tendo por base os diferentes elementos da viga *Flexcrane*, já anteriormente mencionados, foram alvo de análise numérica pelo método dos elementos finitos as configurações mais usuais indicadas nos subcapítulos seguintes. Em todas as configurações analisadas o comprimento do conjunto é de 4000 mm total. Todas as configurações descritas e analisadas partilham os elementos anteriormente descritos, variando apenas a disposição em que são montados e a inclusão de mais ou menos elementos de reforço.

### 3.2.1. Configuração I

A configuração I é designada por viga simples, composta somente por duas chapas laterais contínuas com comprimento de 4000 mm, conforme Figura 18. Esta é a configuração base, sendo que as outras configurações são obtidas a partir desta acrescentando reforços.

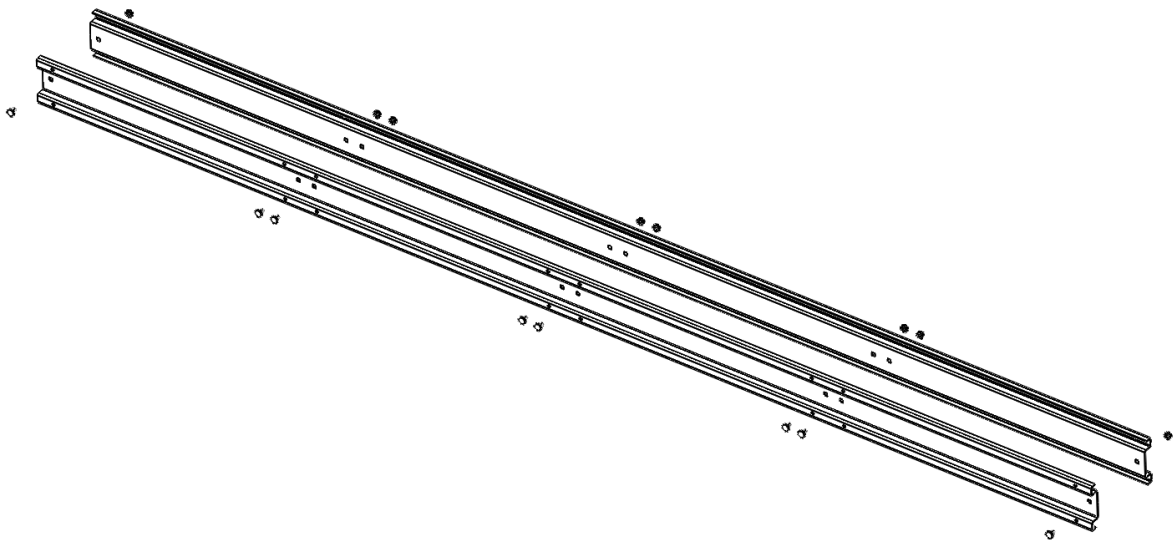
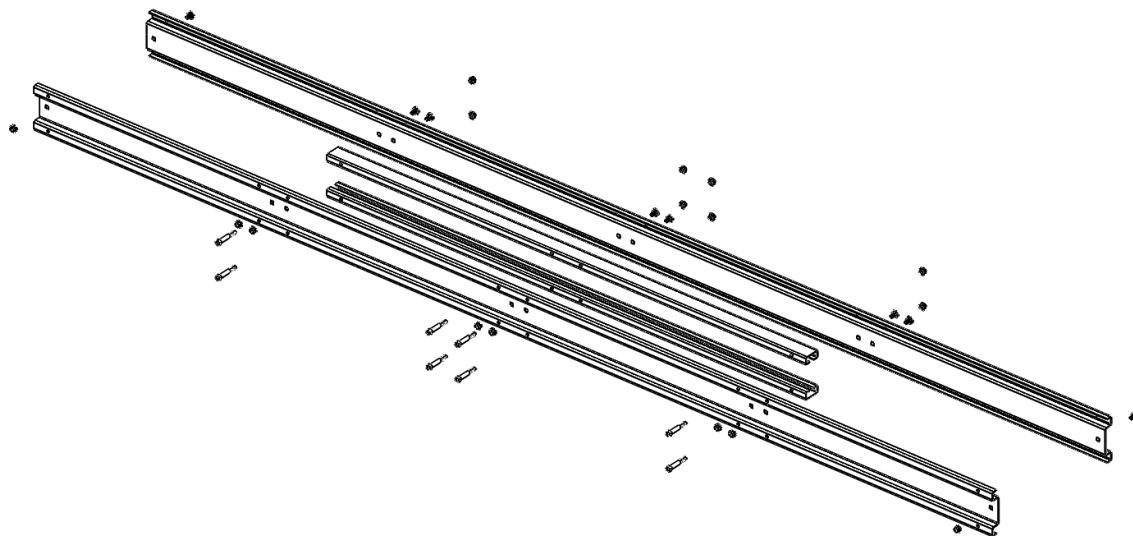


Figura 18 Configuração I (Vista Explodida)

### 3.2.2. Configuração II

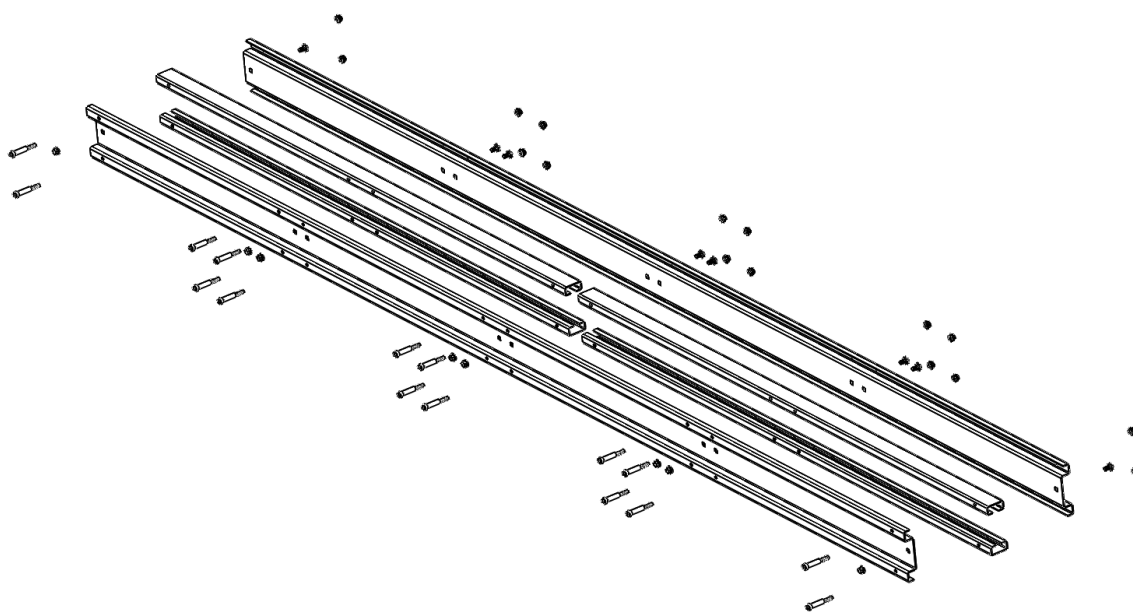
Como todas as configurações anteriores apresentadas, esta também apresenta dois perfis laterais contínuos com comprimento de 4000 mm com dois reforços a meio vão com comprimento de 2000 mm, Figura 19



**Figura 19 Configuração II (Vista explodida)**

### **3.2.3. Configuração III**

Esta configuração é composta por duas chapas laterais com comprimento de 4000 mm juntamente com quatro reforços com comprimento de 2000 mm, sendo que a sua descontinuidade observa-se a meio vão, no entanto a transmissão de esforços é assegurada pela ligação parafusada realizada a meio vão, Figura 20



**Figura 20 Configuração II (Vista explodida)**

### 3.2.4. Configuração IV

A configuração II é constituída por quatro chapas laterais com comprimento de 2000 mm e por dois reforços com comprimento de 2000 mm, estes permitem a continuidade da viga como ilustrado na figura seguinte.

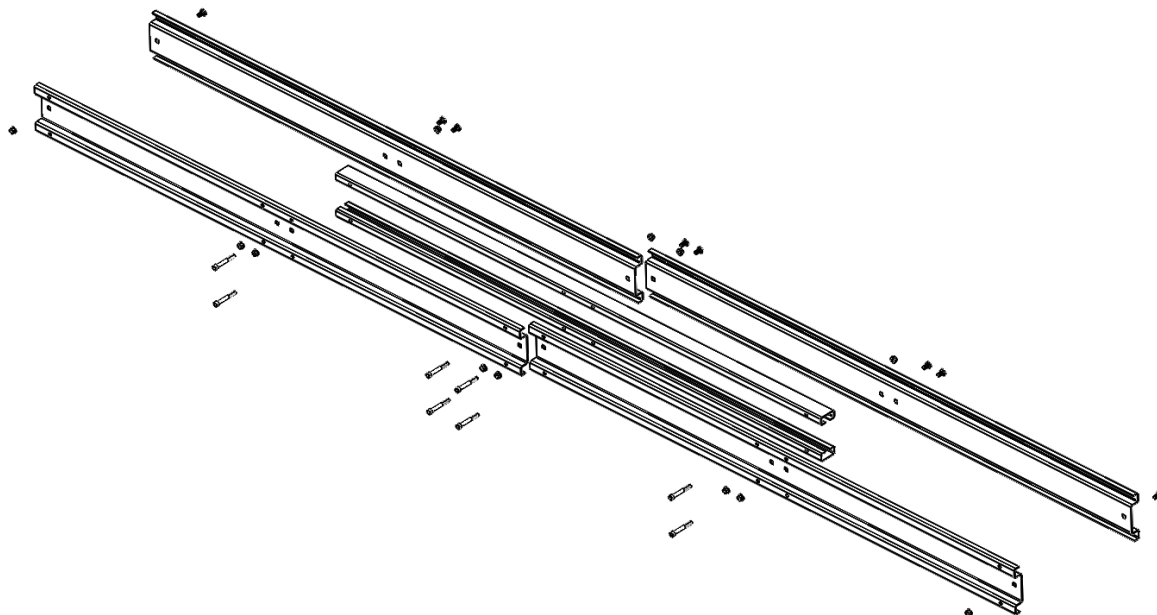


Figura 21 Configuração IV (Vista explodida)

### 3.3. Simulações

Numa primeira abordagem às simulações, e como previsto inicialmente, foi utilizado o *software Autodesk Simulation*.

Desde logo, a utilização deste *software* criou inúmeras dificuldades: problemas na instalação; erros durante as simulações após várias horas de cálculo, com origem em falhas dos *plugins* e de possíveis incompatibilidades com *hardware* ou *software* não permitindo salvar o trabalho até então realizado; elevada utilização de recursos computacionais.

O tempo gasto com estes problemas foi elevado e incompatível com os prazos de entrega da dissertação.

Tendo em conta todos estes fatores, aliados com a falta de informação disponível sobre o *software* em questão, decidiu-se avançar com as simulações utilizando para isso o *Ansys Workbench*.

A iniciação a este *software* passou pela aquisição de conhecimento sobre as principais funcionalidades do mesmo assim como os princípios básicos de funcionamento. Apesar de esta ser uma ferramenta de trabalho muito intuitiva e com as intervenções a serem realizadas de forma direta e rápida, durante as primeiras simulações foram surgindo alguns problemas o que levou a que as simulações fossem feitas por etapas de forma a perceber como é realizado o cálculo e a razão de determinados erros que ocorriam durante as simulações ao mesmo tempo que adquiria mais conhecimento sobre o *software*.

### **3.3.1. Aplicativo utilizado**

Entre os vários aplicativos disponíveis no *Ansys Workbench* foi selecionado para questões de cálculo da estrutura o *Static Structural* (Análise estrutural estática).

A análise estrutural estática possibilita a determinação de deslocamentos, tensões, deformações e forças de reação nas estruturas ou componentes. As condições de carga e respostas são assumidos no cálculo quando estes variam lentamente relativamente ao tempo.

Os tipos de carga que pode ser aplicado em uma análise estática incluem:

- Forças aplicadas externamente e pressões;
- Forças de inércia no estado estacionário (como gravidade ou velocidade de rotação);
- Deslocamentos impostos (diferente de zero);
- Temperaturas.

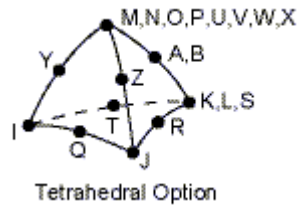
De salientar, a análise estrutural estática pode ser linear ou não linear. Neste aplicativo todos os tipos de não-linearidades são permitidos - grandes deformações, plasticidade, contacto/abertura entre elementos, hiperelasticidade e assim por diante.

### **3.3.2. Primeira abordagem às simulações**

Na primeira simulação realizada, utilizando as modelações feitas no *SolidWorks* e posteriormente exportadas para o *Ansys*, foram utilizadas todas as condições pré-estabelecidas pelo *software*, inclusive tipo de elemento, tamanho e contactos entre as várias superfícies.

Por defeito o *Ansys Workbench* utiliza elementos sólidos tetraédricos, conforme Figura 22. Estes elementos são obtidos a partir de elementos tipo *brick*, e por colapso de arestas em pontos, resultando na sobreposição de nós em alguns vértices do tetraedro.

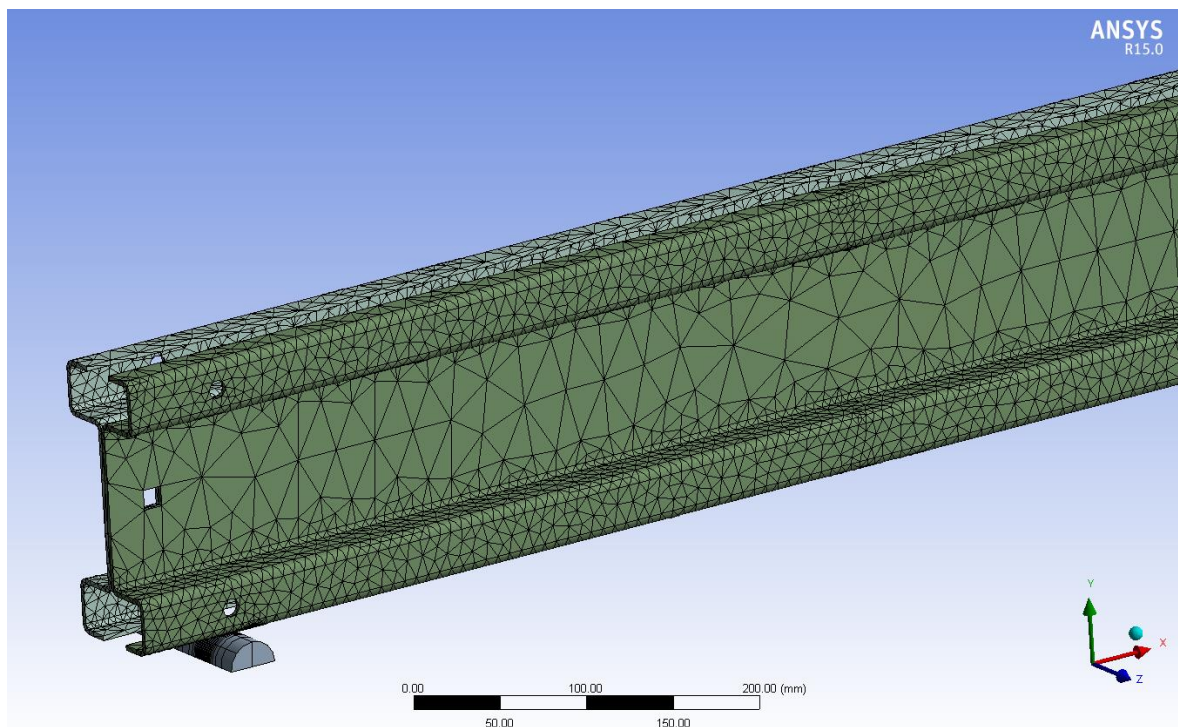
O *software* denomina este tipo de elemento por **Solid186**, sendo este elemento tetraédrico com 20 nós.



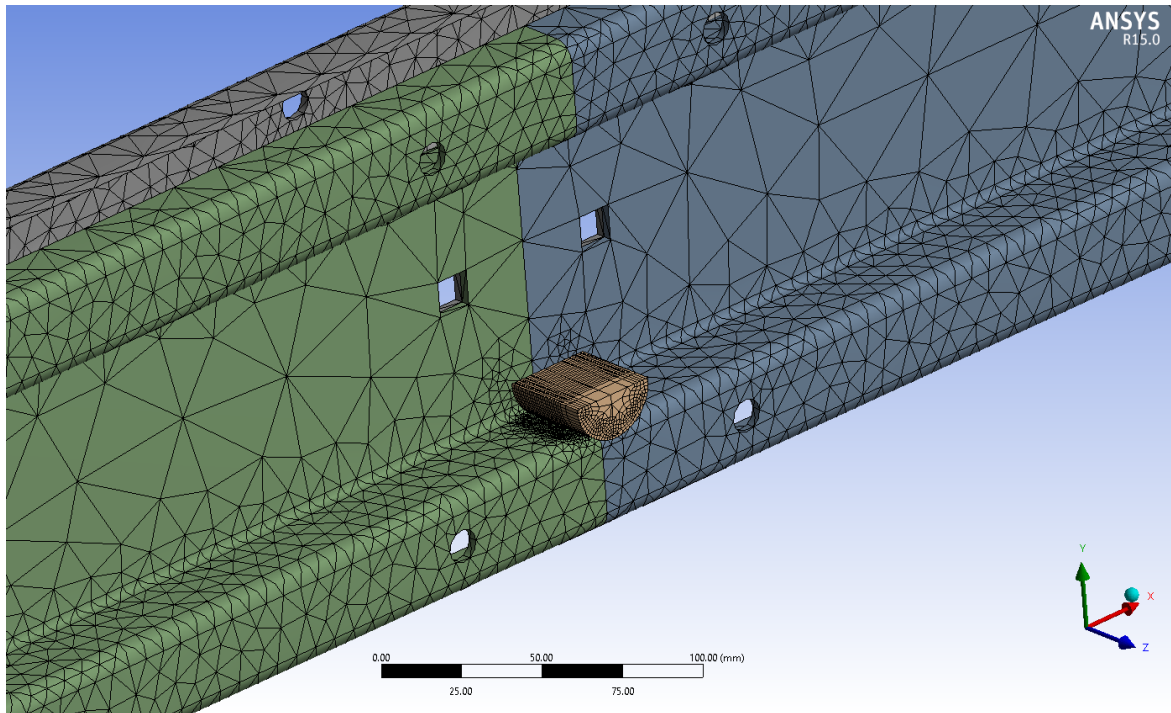
**Figura 22** Elemento pré estabelecido pelo software

Utilizando os parâmetros por defeito, para a gerar a malha dos vários componentes envolvidos na simulação, obteve-se uma malha com 278561 elementos e 539786 nós.

A malha aplicada, de forma automática pelo *software*, pode ser observada na Figura 23, podendo ainda ser observado o refinamento de malha resultante de partições em áreas menores para definição das superfícies de contacto na Figura 24.



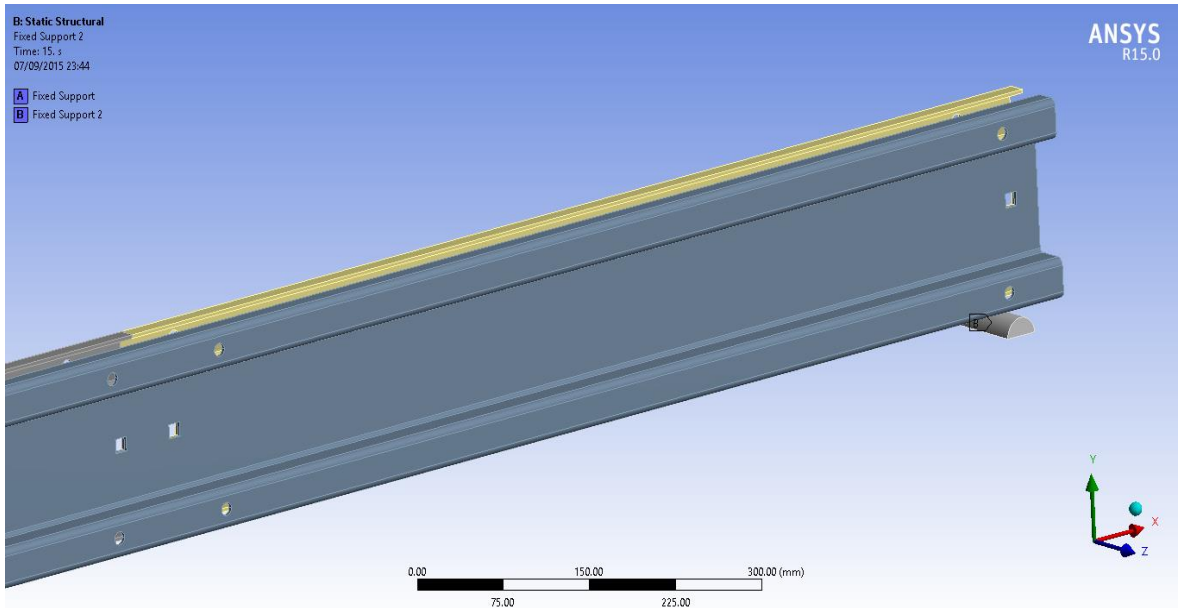
**Figura 23** Malha definida pelo software



**Figura 24 Refinamento na zona de contacto**

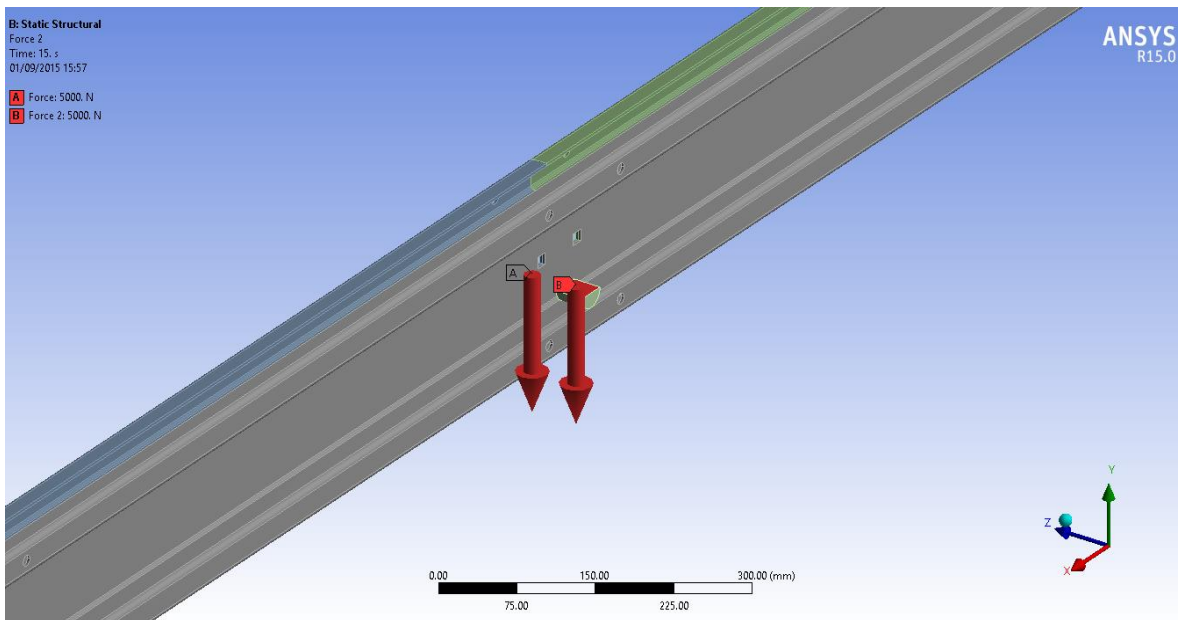
Para as superfícies em contacto o código estabelece por defeito a condição *bonded*. Este tipo de restrição ou ligação não sendo o mais adequado para uma boa aproximação ao problema real foi apenas usada nesta primeira simulação. Nas simulações seguintes foi utilizada a condição *frictionless*, por ser mais adequada ao problema real.

Para os apoios foi modelado meio cilindro, conforme Figura 25, sendo este encastrado pela base e utilizando a condição *bonded* com a viga.



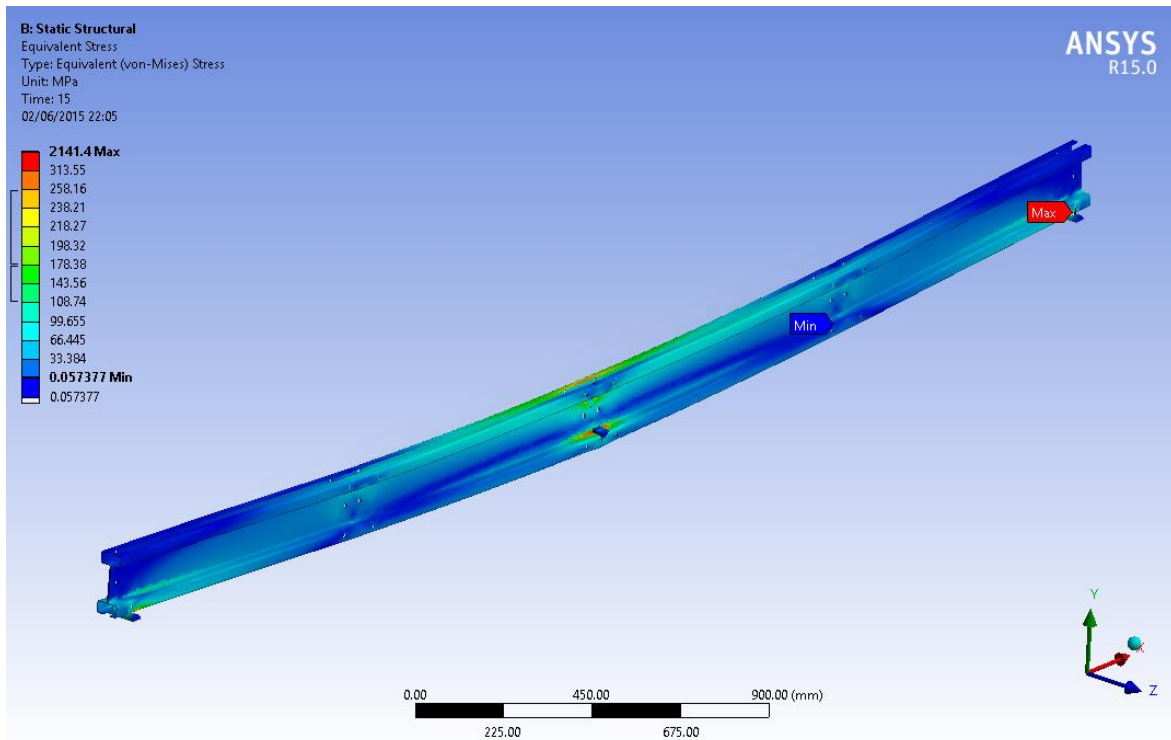
**Figura 25 Condições de apoio**

No ensaio numérico foram aplicadas duas forças verticais (segundo yy) de 5000 N a meio vão, como mostra a Figura 26. Estas cargas foram aplicadas a dois meios cilindros, simulando assim a transmissão de forças entre as rodas do carro e a viga, de salientar que mais uma vez foi considerado a condição de ligação *bonded*.

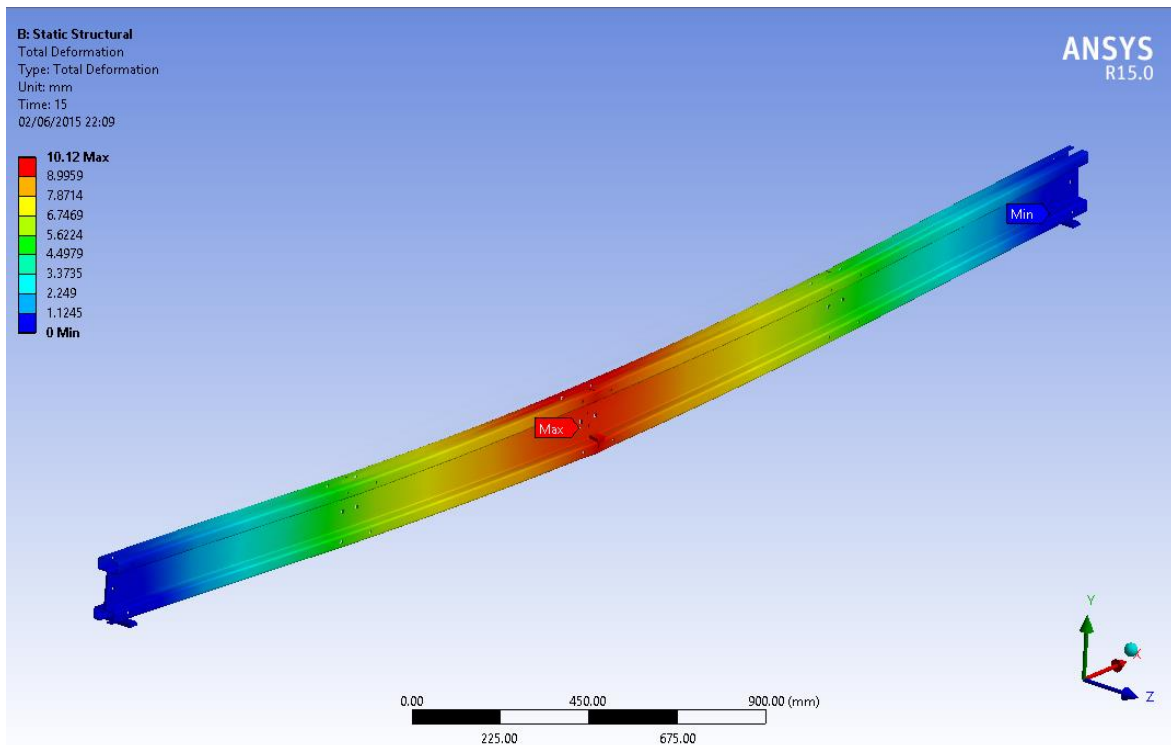


**Figura 26 Cargas aplicadas**

Obteve-se como resultado desta simulação os deslocamentos totais da viga assim como a tensão equivalente (Von Mises) dos vários componentes, como mostram as figuras a baixo.

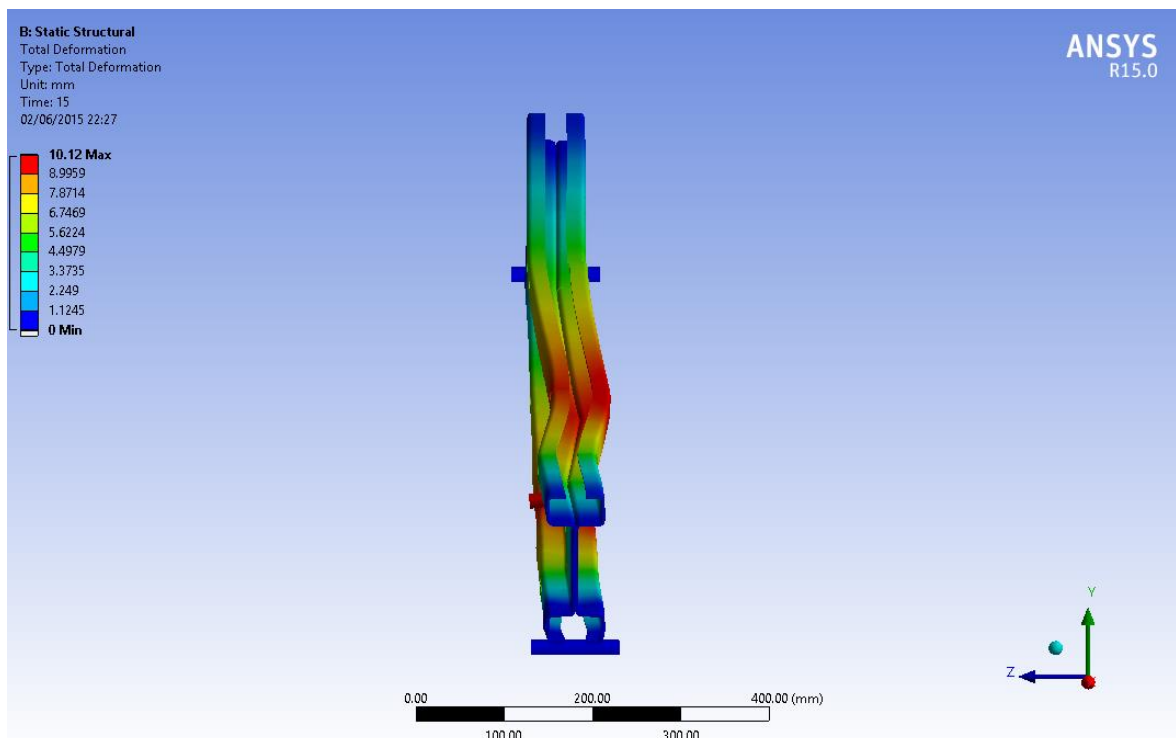


**Figura 27 Tensão equivalente [Mpa]**



**Figura 28 Deslocamentos totais [mm]**

Apesar da simplicidade das condições de contacto impostas e das condições fronteiras nos apoios estarem algo afastadas da realidade, verificou-se o aparecimento de flexão desviada, com a viga claramente a sair do plano. Foi este comportamento que levou a empresa a por de parte este tipo de configuração de montagem. Este comportamento está patente na Figura 29.



**Figura 29 Flexão desviada**

Na persecução de melhores resultados, foram alteradas as condições de contactos entre os elementos e as condições nos apoios. Os elementos passaram a estar sujeitos a condição *frictionless*, esta condição difere da *bonded* ao permitir deslizamento entre as superfícies.

Esta tentativa de otimização da simulação, com o objetivo de aproximar melhor à realidade não foi bem conseguida nas primeiras tentativas surgindo vários problemas. Quando definidos os contatos entre superfícies dos vários elementos não se alcançava convergência da solução ou as simulações prolongam-se por várias horas obtendo no fim do cálculo penetração entre as diferentes partes.

Após as mais variadas tentativas não conseguidas, decidiu-se realizar a modelação de todos os elementos no aplicativo do próprio *Ansys* a partir das quais se realizou posteriormente as simulações. A partir deste momento foi notório o êxito das simulações, não só a nível dos

resultados que iam de encontro ao espectável, como a definição da malha, a velocidade de cálculo assim com os problemas de contactos entre as várias superfícies.

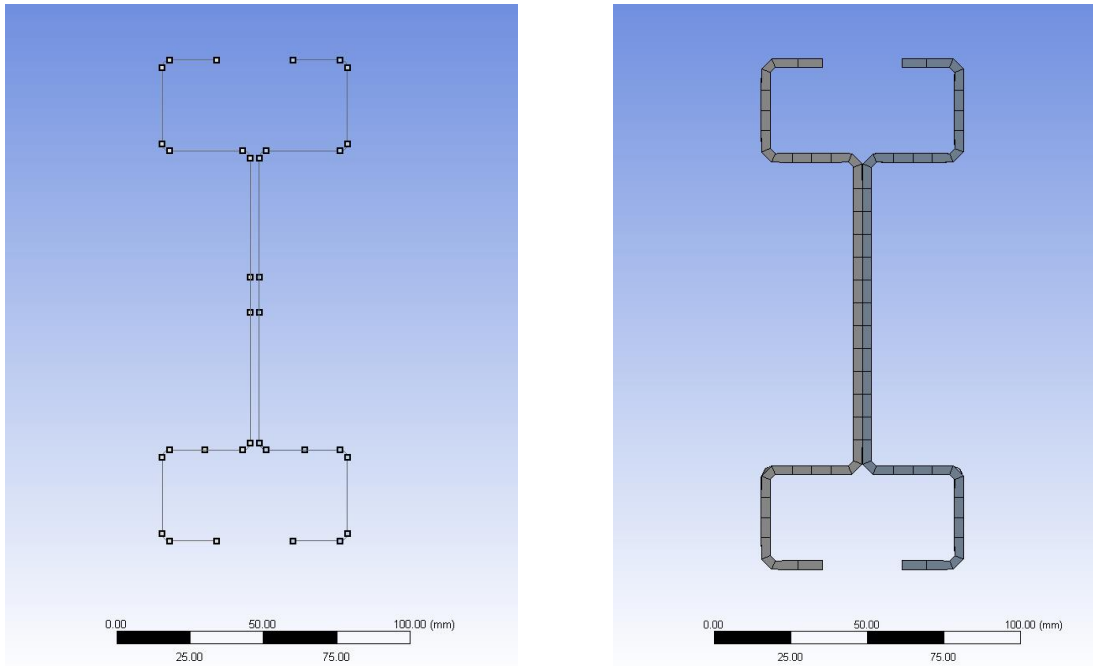
Estas novas modelações, devido ao modo como foram realizadas, implicaram a alteração do tipo de elemento utilizado, que será abordado nos próximos capítulos.

### **3.3.3. Tipo de elemento**

O *software* possui inúmeros tipos de elementos de malha no entanto, tendo em conta a geometria em análise o *software*, de forma automática, define o tipo de elemento mais adequado. O utilizador pode sempre definir outros vários aspetos, como o tamanho máximo e mínimo dos elementos nas várias superfícies da geometria, se pretende manter ou não os nós intermédios dos elementos,

Estas opções devem ter em conta o tipo de análise que se pretende, o tipo de geometria e o poder de cálculo computacional que se dispõe.

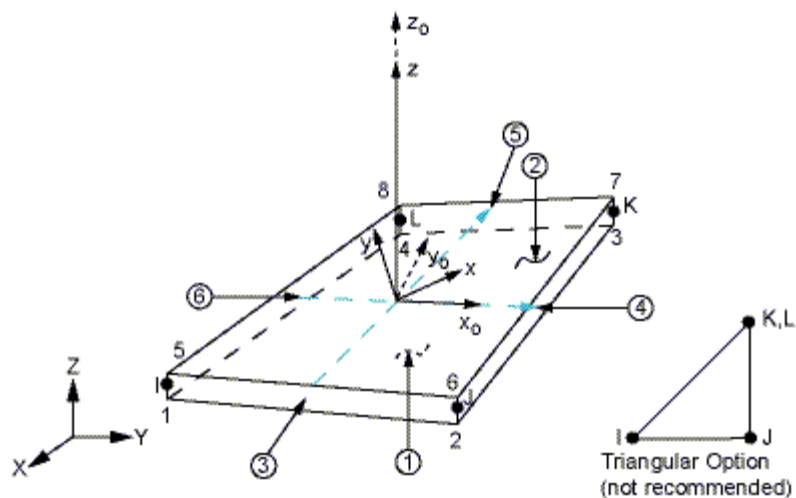
As modelações executadas no *Solidworks* e posteriormente exportadas para o *Ansys Workbench*, levava a que o *software* aplica-se de forma automática elementos sólidos, no entanto como o trabalho de simulação foi levado a cabo num PC de capacidade média, com um processador i7 *Quadcore* e 8 Gb de RAM as simulações utilizando este tipo de elemento foi abandonada uma vez que requeria grande poder computacional. Assim sendo optou-se pela realização das modelações no *DesignModeler* aplicativo do próprio *Ansys Workbench*, onde os vários componentes da viga *Flexcrane* foram modelados com espessura nula, sendo esta determinada mais tarde pelos elementos de malha, como mostra a Figura 30. A utilização de elementos de casca foi assim possível tornado as simulações possíveis em tempo útil.



**Figura 30 Modelação com espessura nula e modelação com espessura definida pela malha**

O elemento utilizado no cálculo é denominado por *Shell181*, este é apropriado na análise de estruturas de espessuras reduzidas. É um elemento de quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó: translação em x, y e z, e rotações segundo os eixos x, y e z.

A Figura 31 mostra a geometria, locais de nós e o sistema de coordenadas para este elemento.



**Figura 31 Elemento de malha**

A seleção deste tipo de elementos em detrimento dos elementos de oito nós deve-se essencialmente ao facto de conseguir um bom compromisso entre o tamanho de elemento de malha e os recursos computacionais disponíveis. Os detalhes geométricos obrigavam a uma malha refinada e a utilização de elementos de oito nós tornaria o processo de cálculo muito demorado.

Foi utilizado para o cálculo da estrutura uma solução iterativa. Esta solução consiste em incrementos de tempo muito reduzidos o que conduz a resultados finais muito mais precisos, no entanto o tempo de cálculo também aumenta significativamente. O incremento de tempo é definido automaticamente pelo *software*, podendo o utilizador definir um mínimo e máximo, assim como o incremento inicial do cálculo.

### 3.4. Resultados

#### 3.4.1. Análise Configuração I

A configuração I, como descrita anteriormente, é composta somente por duas chapas laterais de 4000 mm ligadas entre si.

Como condição fronteira, para a realização do cálculo numérico, foram considerados dois apoios, Figura 32. Estes apoios foram configurados para permitir somente rotação em torno do eixo do furo, eixo global xx. Este tipo de apoio é possível considerar recorrendo à ferramenta *Remote Displacement*. Este tipo de apoio configura um apoio duplo.

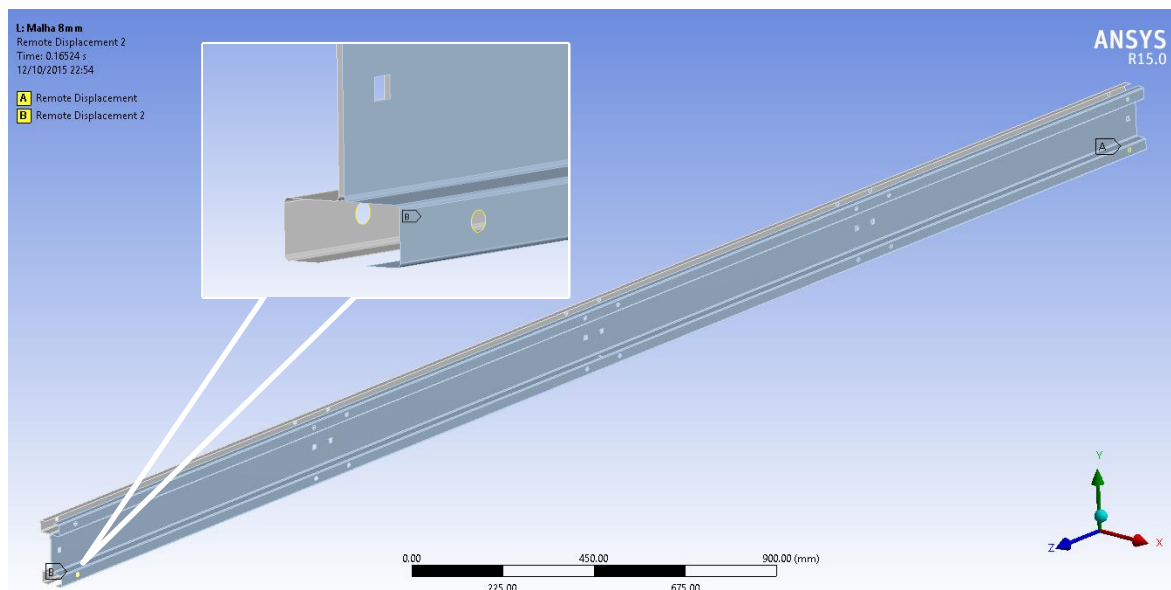
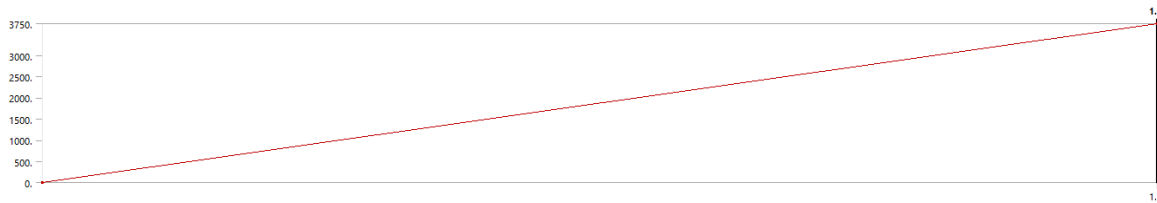


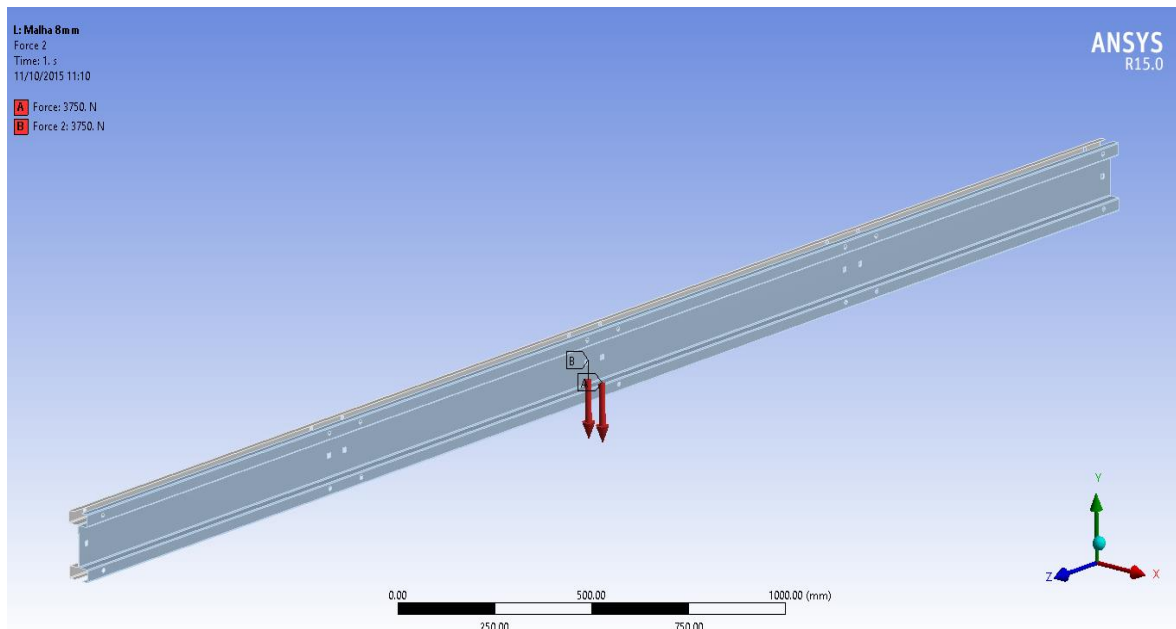
Figura 32 Condições de apoio (Configuração I)

A utilização de dois apoios duplos configura uma ligação hiperstática, no entanto é a mais próxima da realidade do ensaio.

A meio vão da viga foram impostas duas cargas, segundo o eixo yy, com um valor de 3750 N cada, Figura 34. Estas cargas são aplicadas de forma gradual durante o decorrer do cálculo, tal como evidenciado na Figura 33

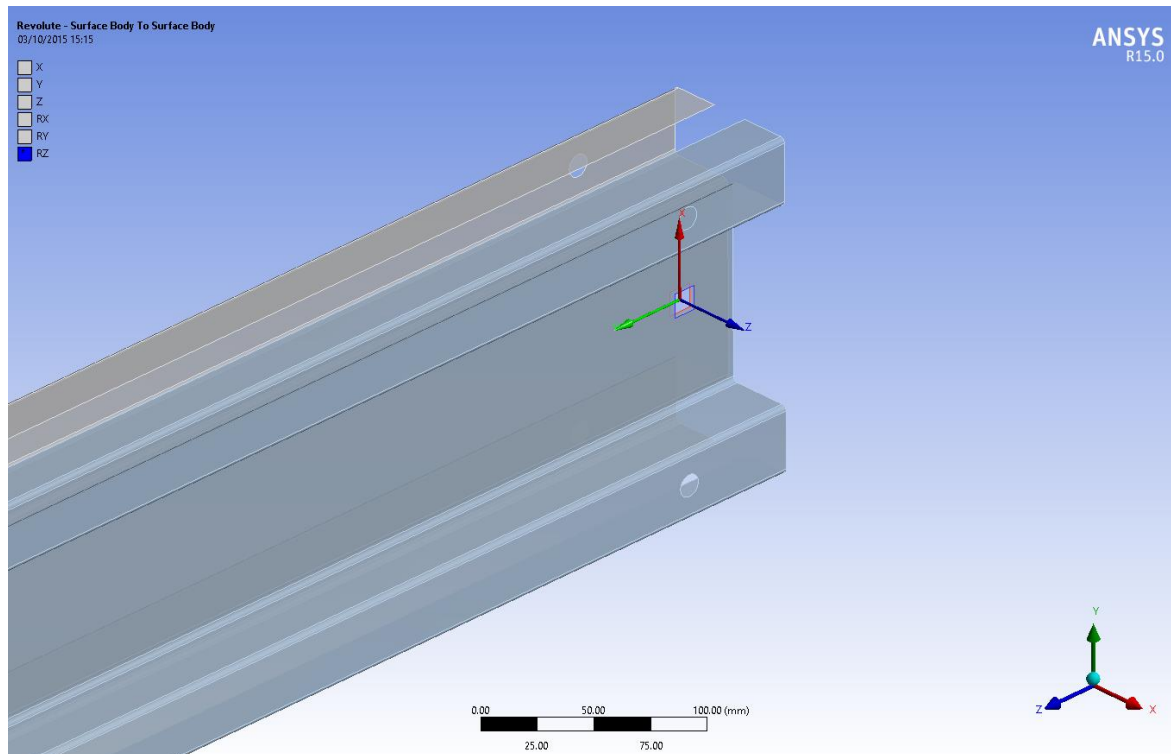


**Figura 33 Carga imposta – Eixo xx (s) Eixo yy (N)**



**Figura 34 Carga imposta (Configuração I)**

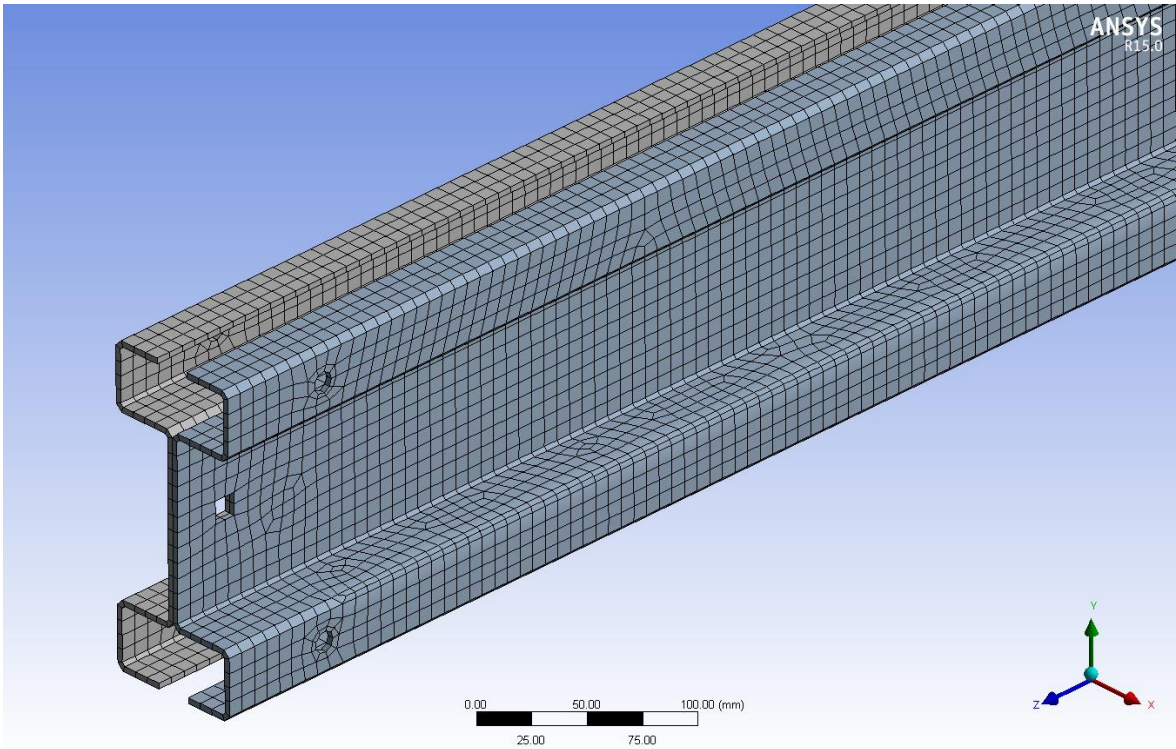
A ligação entre os vários elementos em análise é assegurada por pinos pré definidos pelo *software*, possibilitando a rotação de um componente relativamente a outro segundo zz, coordenada local, Figura 35, e impedindo quaisquer translações;



**Figura 35** Fixação entre as chapas laterais (Configuração I)

As superfícies na iminência de entrarem em contacto durante a análise estão definidas de forma a deslizarem sem atrito e sem penetração, utilizando para isso a opção *frictionless*. Este contacto está definido de acordo a pré configuração do *software*.

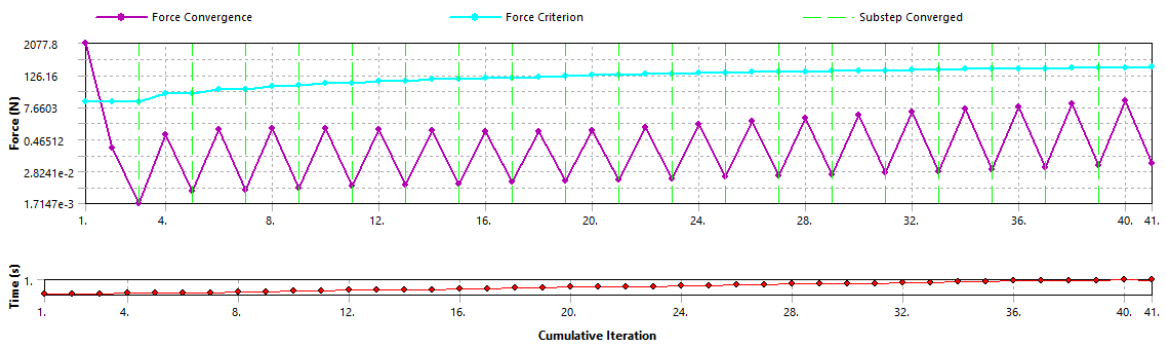
Como descrito anteriormente, o tipo de elemento foi determinado de forma automática pelo *software*, embora previamente condicionado pela modelação em superfícies. Posteriormente foi definido o tamanho dos elementos, 8 mm. Em torno dos furos o tamanho do elemento estabelecido foi de 4 mm, para que se conseguisse um bom compromisso entre a geometria dos mesmos e a malha envolvente, como se pode observar na Figura 36. Com estas condições foi gerada uma malha com um total de 38168 elementos e 39396 nós.



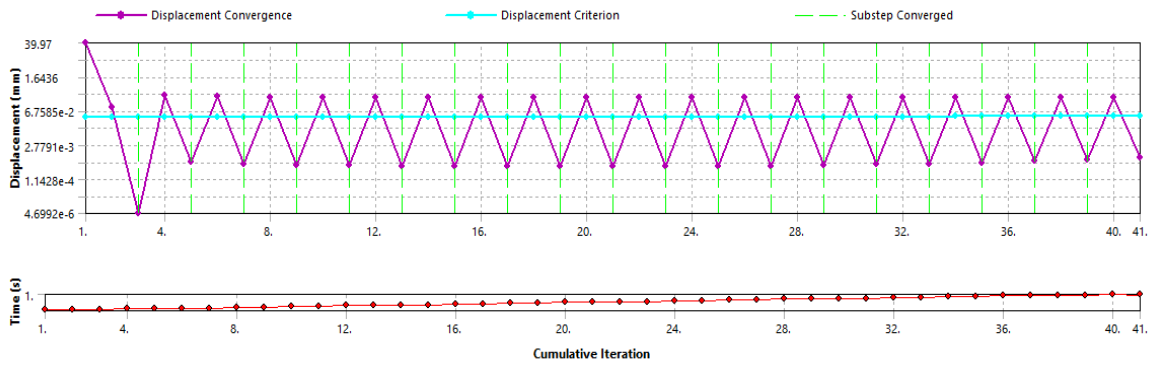
**Figura 36 Malha aplicada (Configuração I)**

A análise realizada tem uma duração de 1s, sendo este subdividido em vários incrementos de tempo. Neste caso foi estabelecido como incremento 0.05s apenas para obtenção de uma maior gama de resultados.

O gráfico abaixo, indica os vários incrementos realizados e a convergência dos mesmos, sendo o cálculo realizado num total de 20 steps.



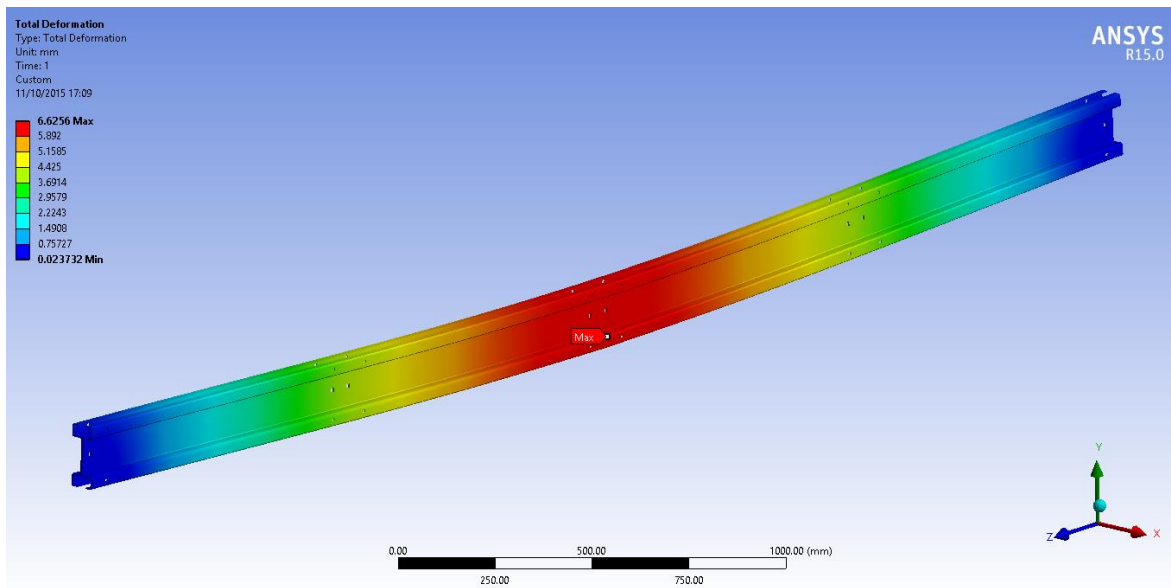
**Figura 37 Gráfico de convergência da força**



**Figura 38 Gráfico de convergência do deslocamento**

Na figura seguinte estão representados os deslocamentos totais da viga em mm, sendo que esta apresenta o deslocamento máximo a meio vão, sendo este de 6.626 mm.

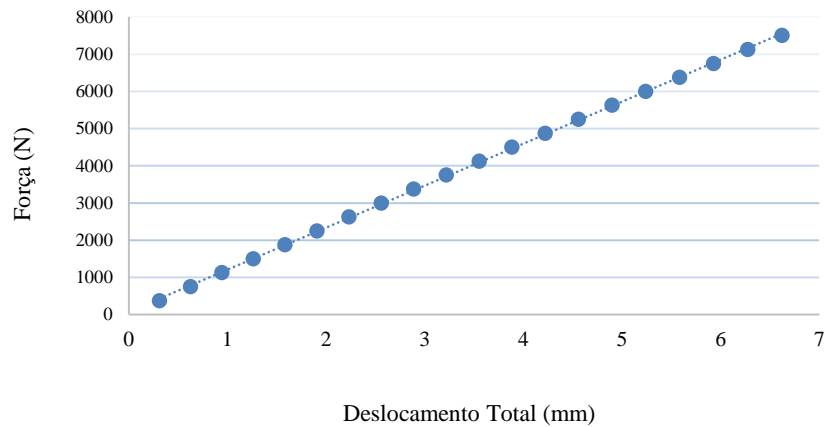
De salientar que todas as imagens representativas de resultados das simulações, por questões de melhor visualização, apresentam um fator de ampliação de 10x.



**Figura 39 Deslocamentos totais (mm)**

O deslocamento total da viga em função da carga aplicada pode ser traduzido na linha representada no gráfico seguinte.

### Configuração I - Carga Vs Deslocamento



Na Figura 40, está representado o campo de distribuições de tensões ao longo de toda a extensão da vida. O ponto de maior tensão encontra-se na pressuposta zona de contacto entre as rodas e o banzo.

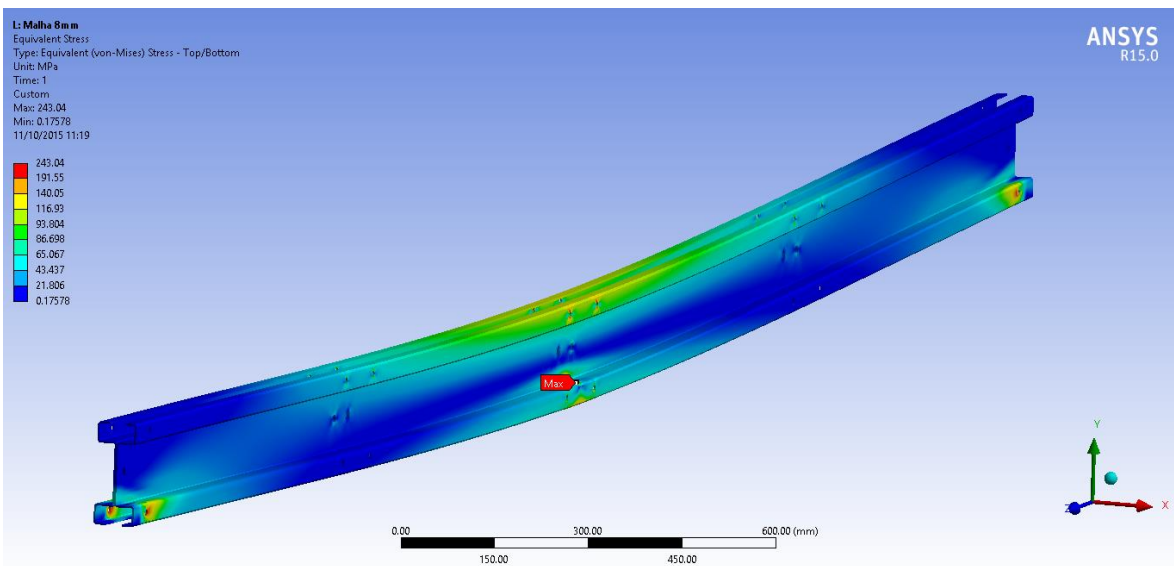
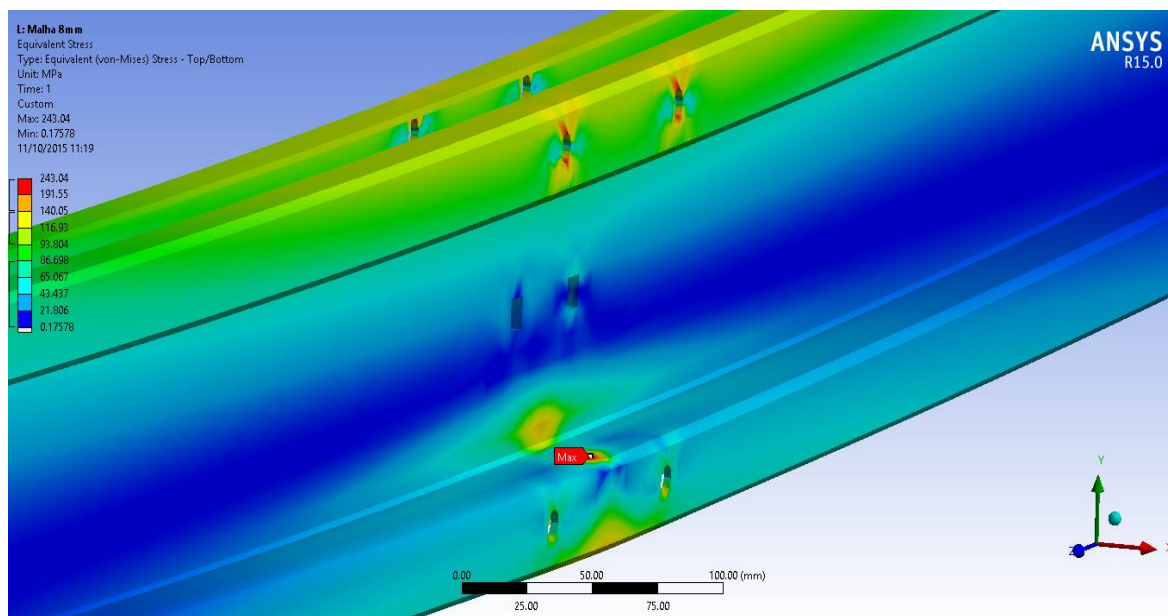


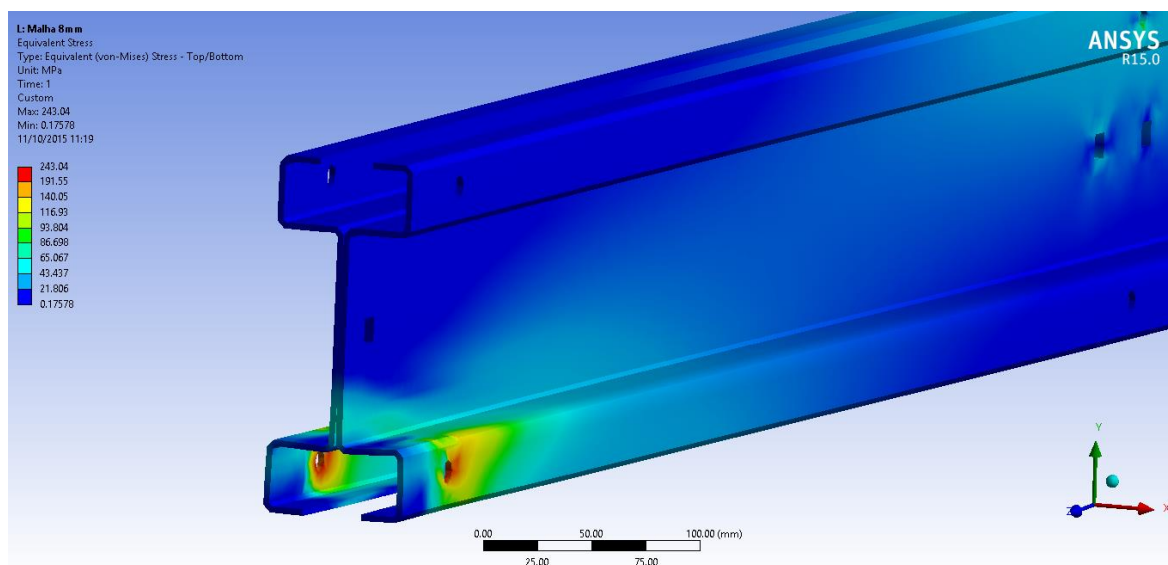
Figura 40 Tensão equivalente – Von Mises (MPa)

Este pico máximo de tensão pode ser visualizado em maior detalhe na Figura 41, onde é dado um maior destaque a essa zona. Nesse local regista-se uma tensão equivalente (Von Mises) de 243.04 MPa.



**Figura 41 Tensão equivalente – Von Mises - Localizada (MPa)**

A área envolvente dos furos de fixação está também submetida a elevada tensão localizada, como se verifica na figura a baixo.



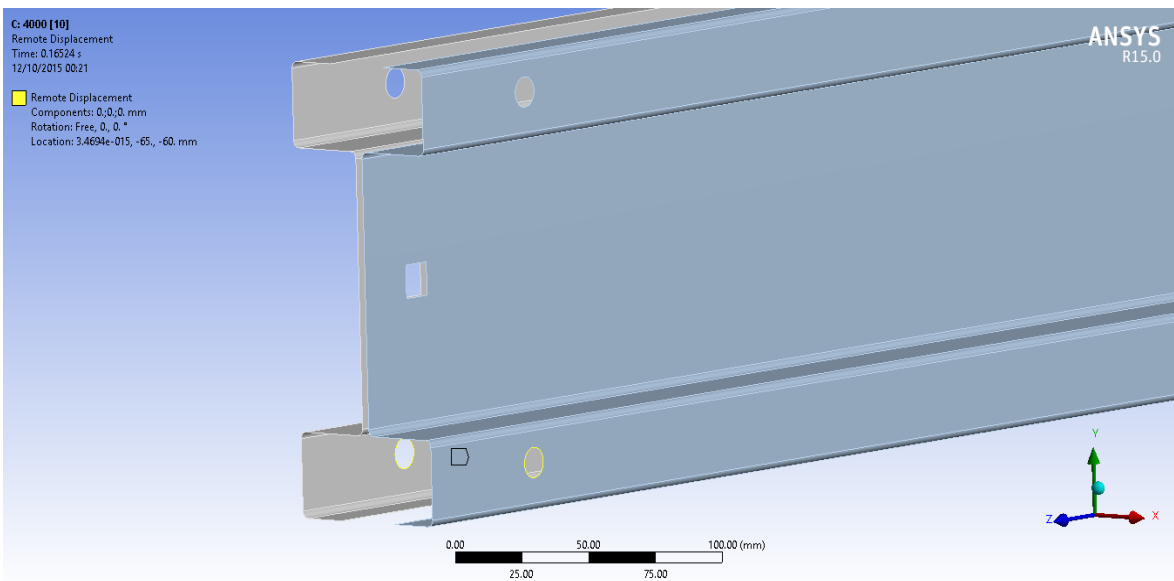
**Figura 42 Tensão equivalente – Von Mises - Localizada (MPa)**

A simulação atrás referida foi realizada com diferentes refinamentos de malha. Desta forma pretendeu-se verificar qual o tamanho de malha mais adequado a utilizar. Para poupar recursos computacionais a malha foi refinada apenas até obtenção de uma satisfatória convergência de resultados. E também tendo em conta as dimensões das peças.

### 3.4.2. Análise Configuração II

A configuração II, conforme Figura 19, é constituída por duas chapas laterais de 4000 mm e dois reforços de 2000 mm colocado a meio vão.

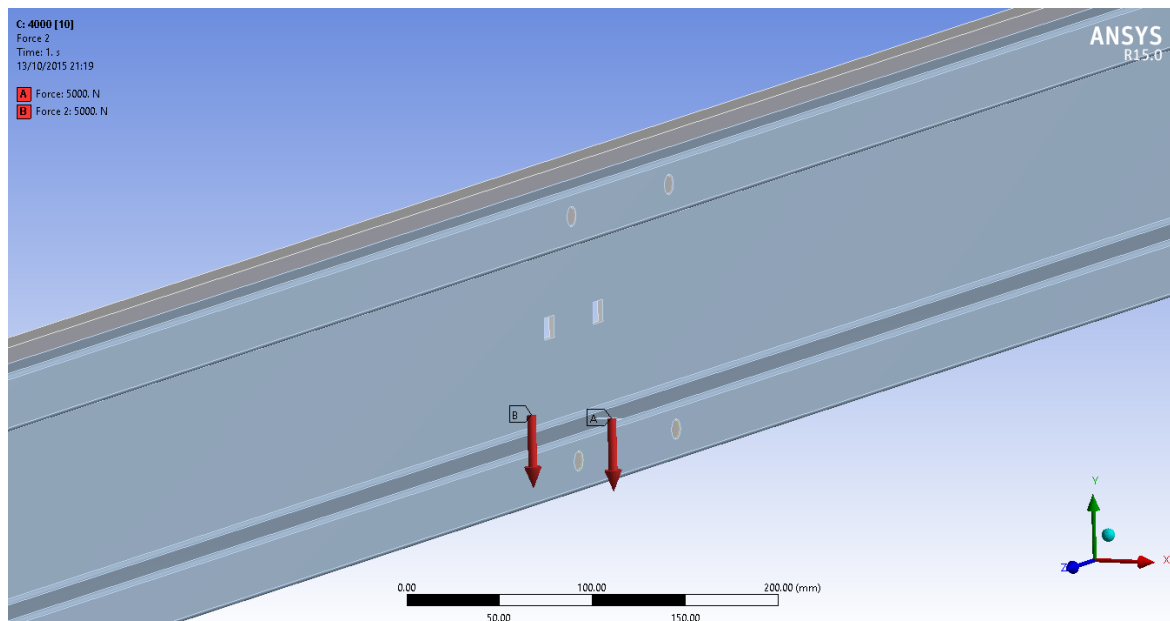
Como condição de suporte para realização do cálculo foram definidos dois apoios que impedem translação segundo os três eixos e rotação segundo zz e yy. Assim sendo o único movimento livre é o de rotação em torno do eixo do furo, eixo xx. Esta condição de apoio é definida pelo *software* como *Remote Displacement*. Na Figura 43 está representado dois dos furos onde foi aplicada essa condição.



**Figura 43 Condições de apoio (configuração II)**

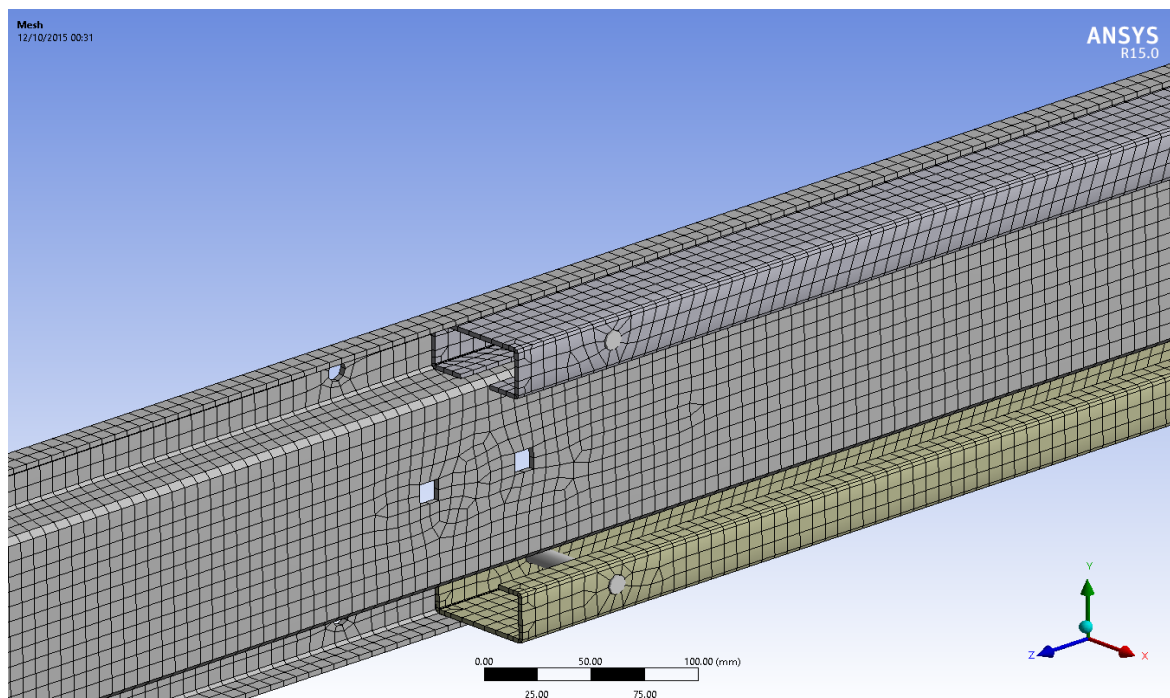
Tal como na configuração I, foram aplicadas duas cargas a meio vão de 5000 N segundo o eixo yy, Figura 44. Esta carga é aplicada de forma gradual durante o decorrer do ensaio, de 0 N a 10000 N.

Para aplicação desta carga foram criadas duas pequenas áreas independentes que simulam o contacto das rodas do carro com o banzo, tal como mostra a Figura 44.



**Figura 44 Cargas aplicadas (configuração II)**

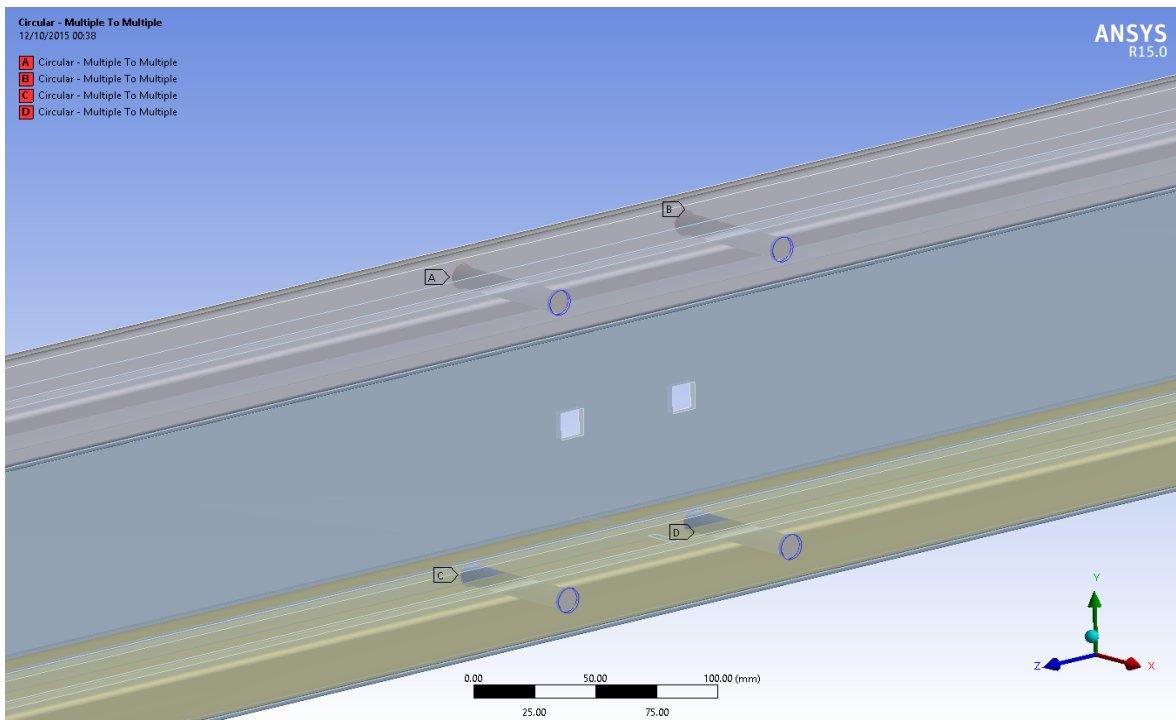
A aplicação da malha foi realizada tendo em conta todos os mesmos parâmetros que na simulação anterior. Tendo esta simulação mais dois elementos estruturais envolvidos o número de elementos aumentou para 47583 e os nós para 49394.



**Figura 45 – Malha aplicada (configuração II)**

Na Figura 45 está representada a malha aplicada, de salientar que uma das chapas laterais foi ocultada para que assim seja possível a visualização da malha nos reforços.

Na viga real a ligação entre os reforços e as chapas laterais é assegurada por parafusos que desempenha as funções de pino, devido ao esforço de corte a que estão sujeitos e ao fraco aperto que recebem. Para simular convenientemente esta ligação, o *software* dispõe de uma ferramenta do tipo pino virtual. Esta ligação entre corpos estabelece condições entre as superfícies dos furos, designada pelo *software* como a opção *Revolute – Body to Body*, possibilitando a rotação de um componente relativamente a outro segundo xx e impedindo quaisquer translações, Figura 46.Figura 52

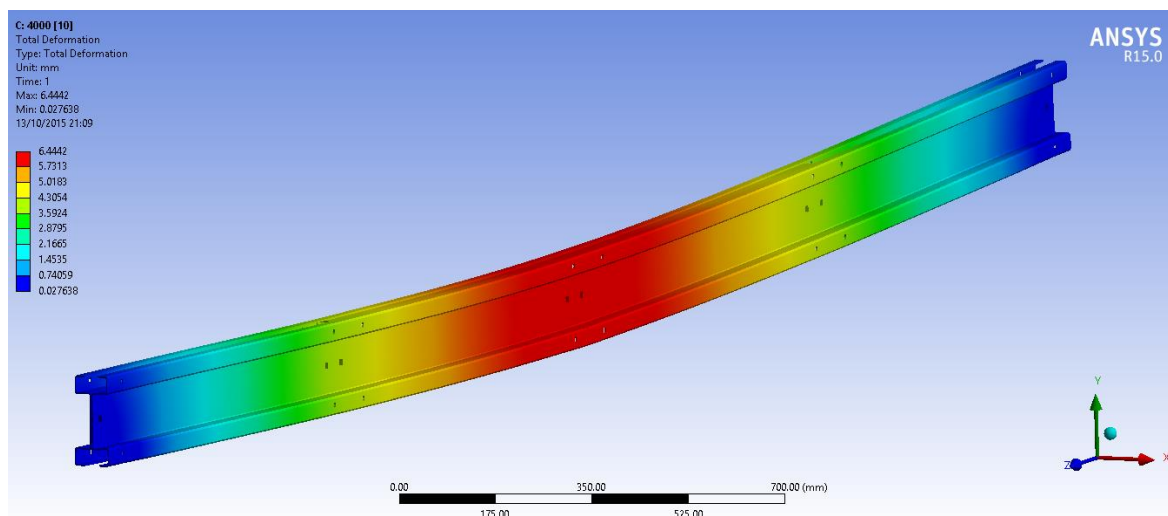


**Figura 46 Ligação entre chapas laterais e reforços (configuração II)**

As superfícies na iminência de entrarem em contacto durante a análise estão definidas de forma a deslizarem sem atrito e sem penetração, utilizando para isso a opção *frictionless*. As definições avançadas deste contacto permaneceram sem qualquer alteração, ou seja, de acordo com a pré configuração do *software*.

Na Figura 47 estão representados os deslocamentos totais da viga em mm, sendo que esta apresenta o deslocamento máximo a meio vão, sendo este de 6.444 mm.

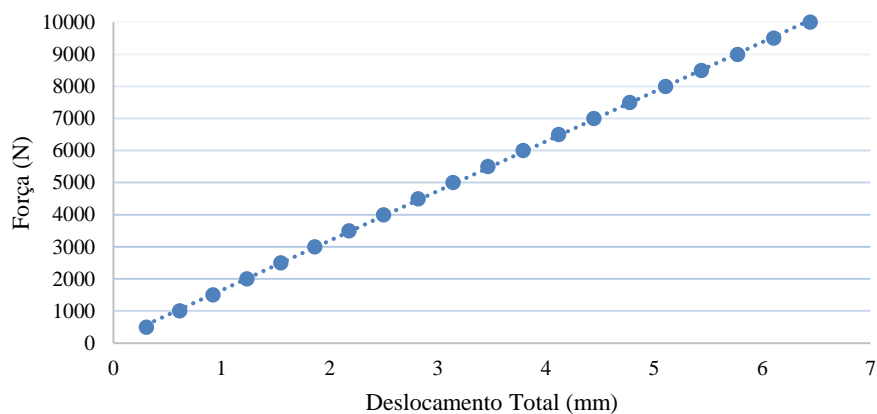
De salientar que todas as imagens representativas de resultados das simulações, por questões de melhor visualização, apresentam um fator de ampliação de 10x.



**Figura 47 Deslocamentos totais (mm)**

O deslocamento total da viga em função da carga aplicada pode ser observado no gráfico seguinte.

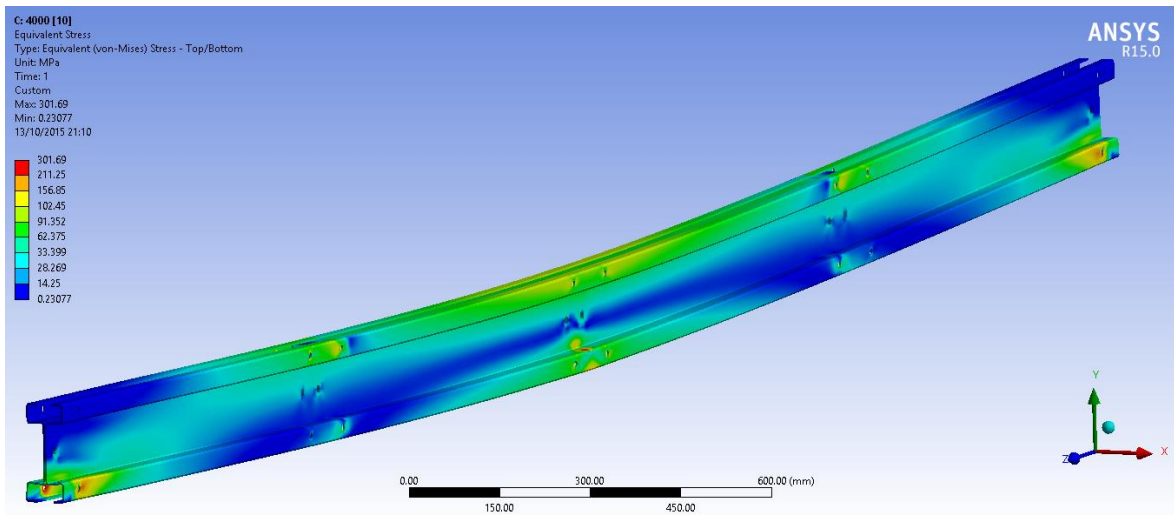
### Configuração II - Carga Vs Deslocamento



**Figura 48 Carga Vs Deslocamentos**

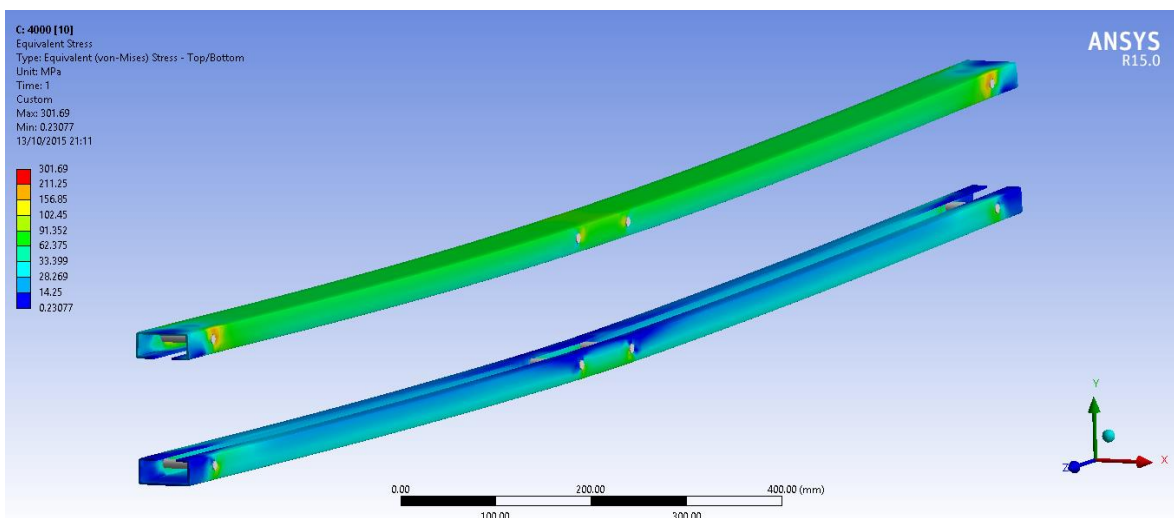
A linearidade do deslocamento em função da carga aplicada verifica-se, tal como seria de esperar, uma vez que apenas é tido em conta a parte linear elástica no ensaio.

Tal como na simulação numérica para a configuração I, as maiores tensões verificam-se no local de contacto entre as rodas e o banzo e na área envolvente dos furos de fixação. Na Figura 49, pode-se visualizar a distribuição de tensões ao longo de toda a extensão da viga.



**Figura 49 Tensão equivalente – Von Mises (MPa)**

A distribuição de tensões nos reforços pode ser visualizada na Figura 50, sendo que as maiores tensões ocorrem na área envolvente dos furos de fixação às chapas laterais.



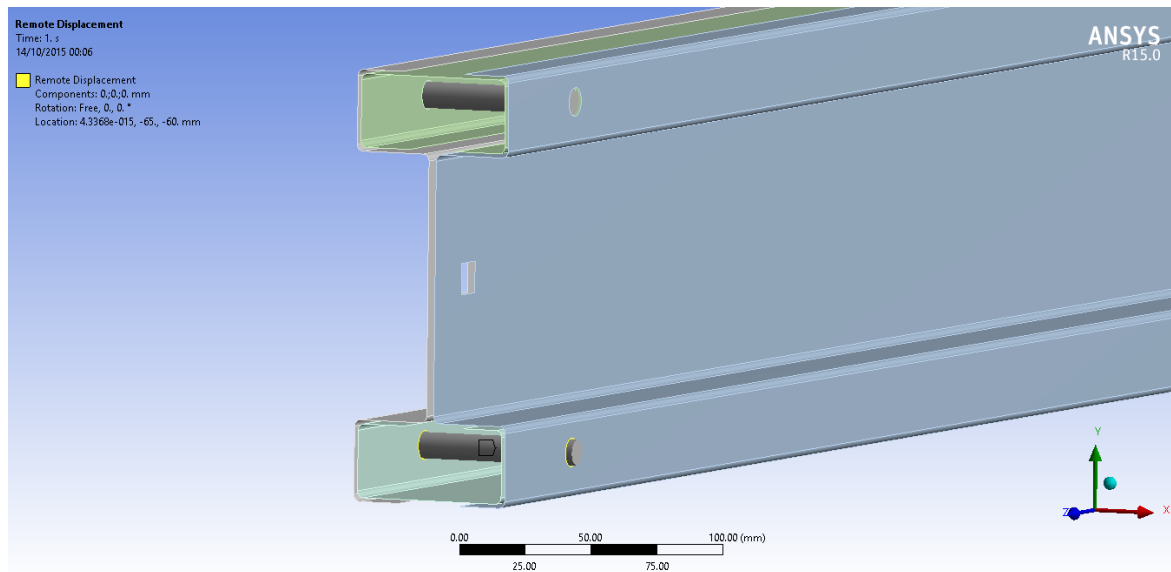
**Figura 50 Tensão equivalente – Von Mises nos reforços (MPa)**

### 3.4.3. Análise Configuração III

A configuração III, é constituída por duas chapas laterais com 4000 mm e quatro reforços de 2000 mm interrompidos a meio vão, Figura 20.

Como condição de suporte para realização do cálculo foi considerado um apoio em cada furo da extremidade da viga que impedem translação segundo os três eixos e rotação

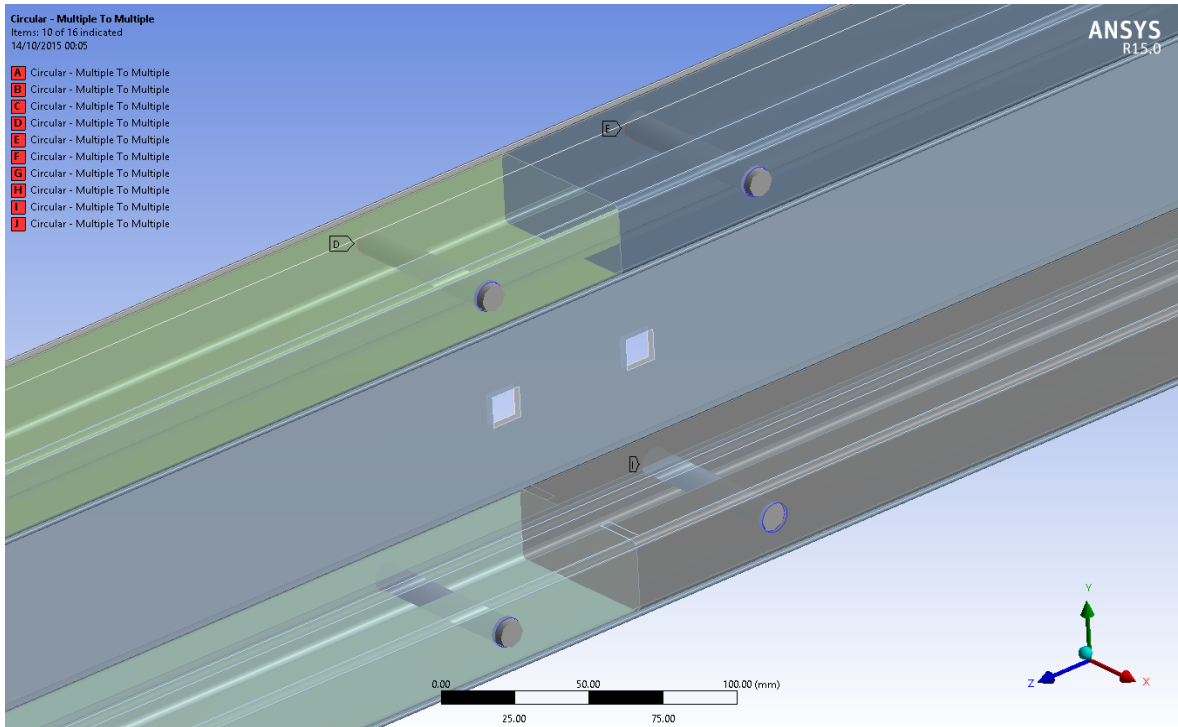
segundo  $zz$  e  $yy$ . Assim sendo o único movimento livre é o de rotação em torno do eixo do furo, eixo  $xx$ .



**Figura 51 Condições de apoio**

As superfícies na iminência de entrarem em contacto durante a análise estão definidas de forma a deslizarem sem atrito e sem penetração, utilizando para isso a opção *frictionless*. As definições avançadas deste contacto permaneceram sem qualquer alteração, ou seja, de acordo com a pré configuração do *software*.

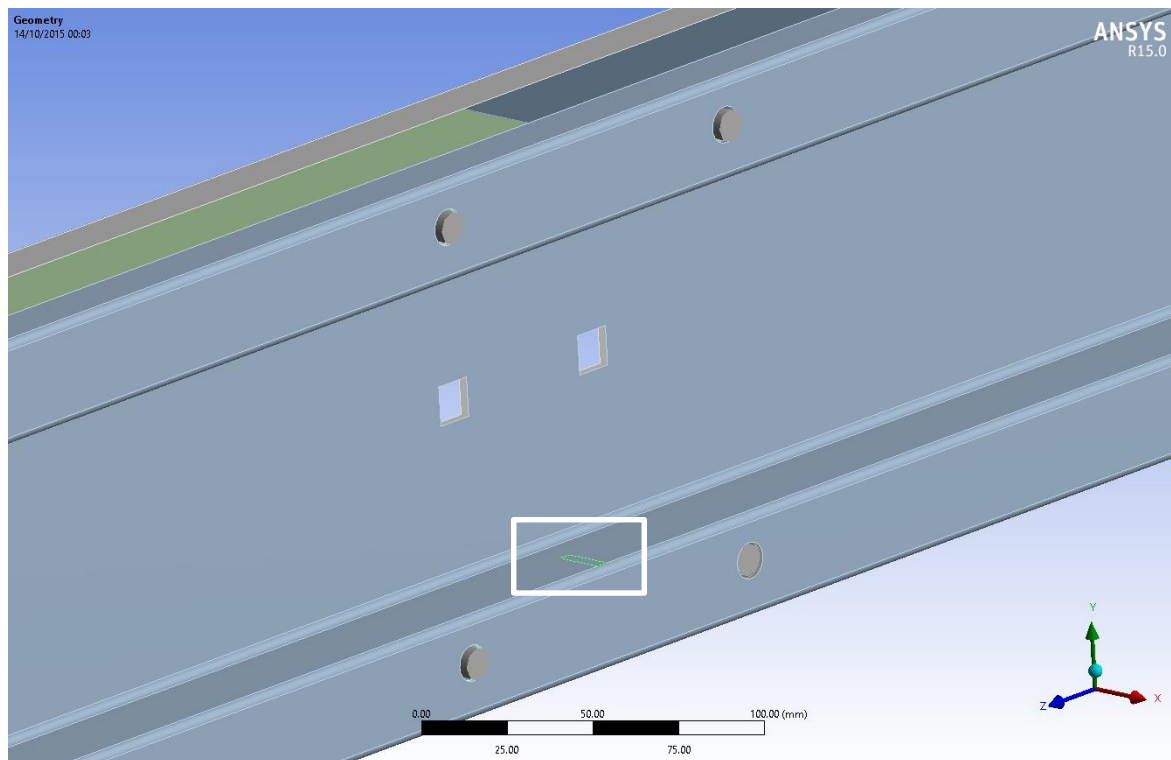
Na viga real a ligação entre os reforços e as chapas laterais é assegurada por parafusos que desempenha as funções de pino, devido ao esforço de corte a que estão sujeitos e ao fraco aperto que recebem. Para simular convenientemente esta ligação, o *software* dispõe de uma ferramenta do tipo pino virtual. Esta ligação entre corpos estabelece condições entre as superfícies dos furos, designada pelo *software* como a opção *Revolute – Body to Body*, possibilitando a rotação de um componente relativamente a outro segundo  $xx$  e impedindo quaisquer translações, Figura 52



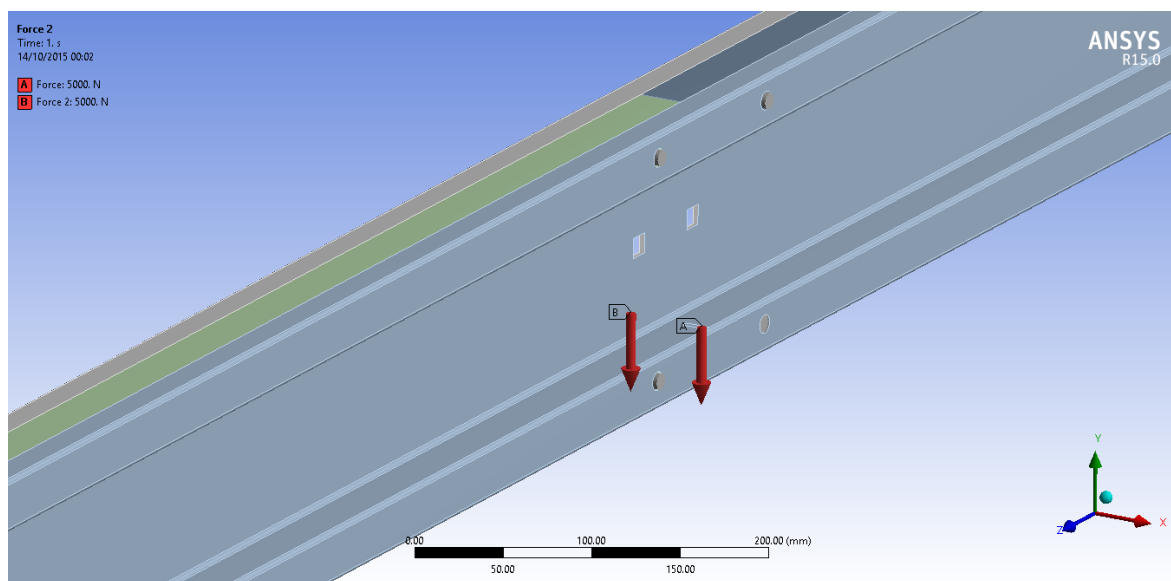
**Figura 52 Ligações entre elementos**

Durante a modelação dos perfis, foi criada uma pequena área que simula o contacto da roda do carro com o perfil, como mostra a Figura 53.

O carregamento foi feito a meio vão com a aplicação de duas forças descendentes, segundo o eixo yy, de 5000 N, Figura 54.



**Figura 53 Zona definida para contacto.**

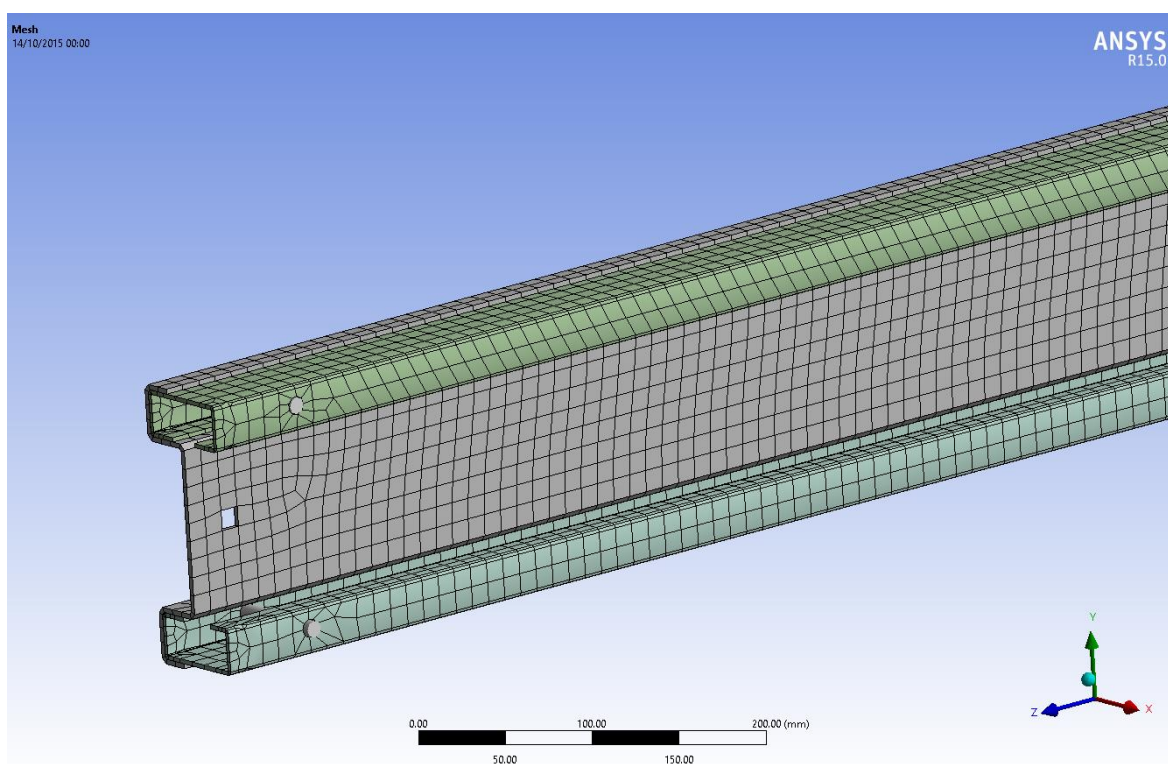


**Figura 54 Deslocamento imposto**

A ferramenta de modelação do *Ansys Workbench* permite que se faça uma modelação de sólidos ou uma modelação de superfícies. Qualquer uma destas é possível de ser utilizada para este tipo de problemas em que os elementos são do tipo enformados a frio. Esta decisão por parte do operador condiciona as escolhas automáticas do *software* seguintes. O

*software* aplicará elementos sólidos a uma modelação sólida e elementos de casca a uma modelação de superfícies.

Como descrito anteriormente, o tipo de elemento foi determinado de forma automática pelo *software*, embora previamente condicionado pela modelação em superfícies. Posteriormente foi definido o tamanho dos elementos, 12 mm e em torno dos furos o tamanho estabelecido foi de 4 mm, para que se conseguisse um bom compromisso entre a geometria dos mesmos e a malha envolvente, como se pode observar na Figura 55. Com estas condições foi gerada uma malha com um total de 33310 elementos e 35006 nós.

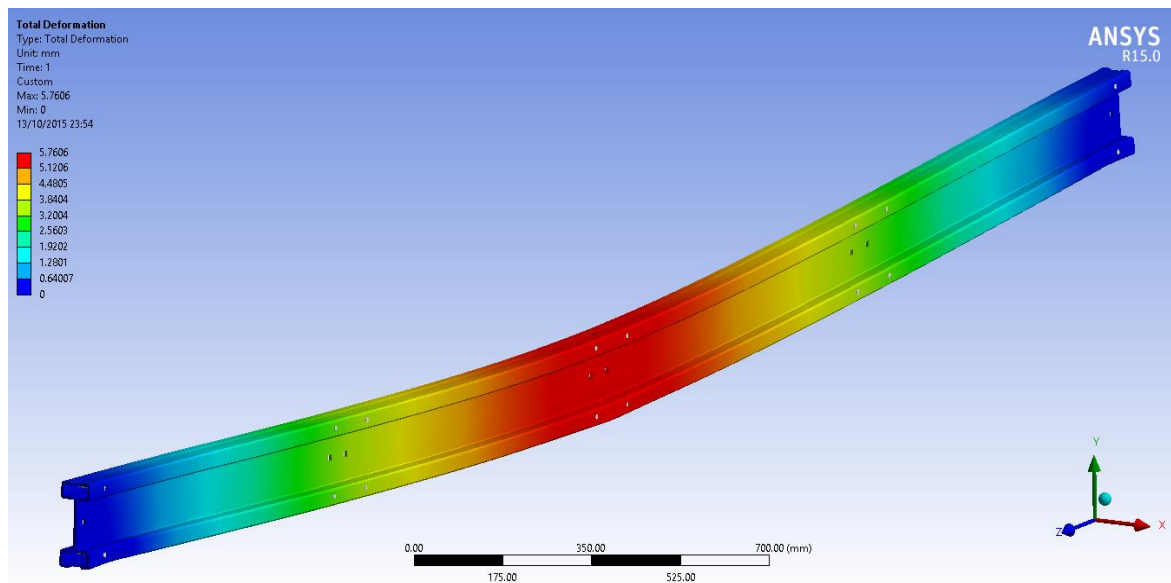


**Figura 55 Malha aplicada**

Após a realização do cálculo obtemos todos os resultados solicitados, neste caso, deslocamentos e tensões equivalentes (Von-Mises).

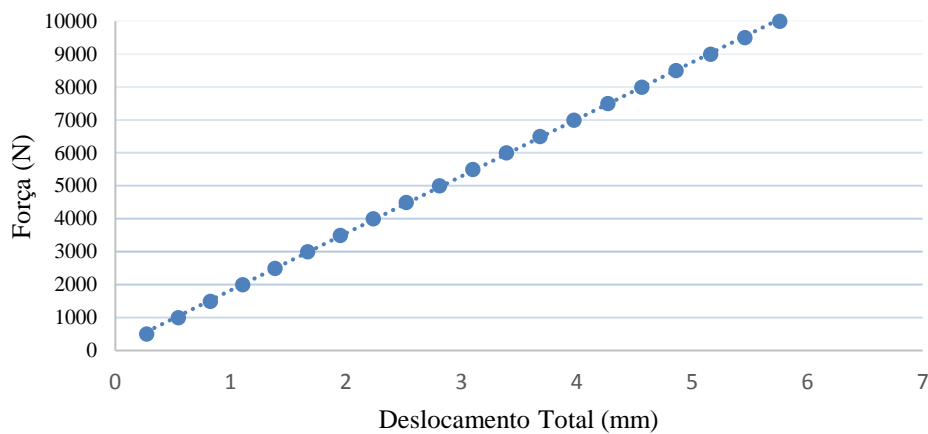
O deslocamento máximo é aproximadamente 5.76 mm, Figura 56, este resultado seria esperado uma vez que corresponde ao deslocamento imposto a meio vão da viga.

De salientar que as imagens representativas de resultados das simulações nesta configuração, por questões de melhor visualização, apresentam um fator de ampliação de 20x.

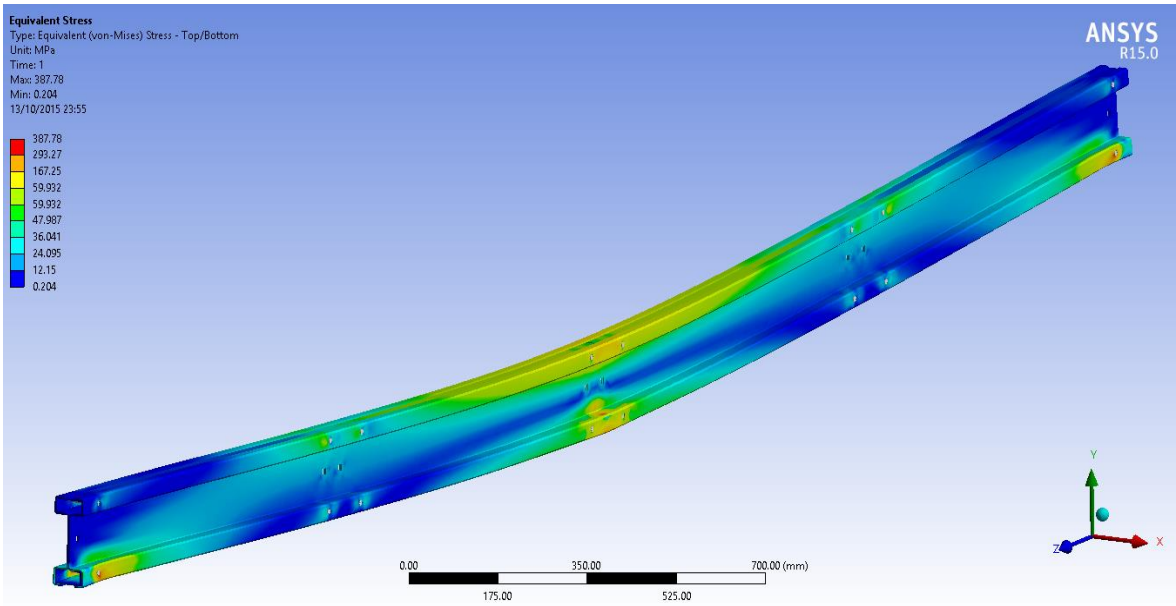


**Figura 56 Deslocamentos totais**

### Configuração I - Carga Vs Deslocamento

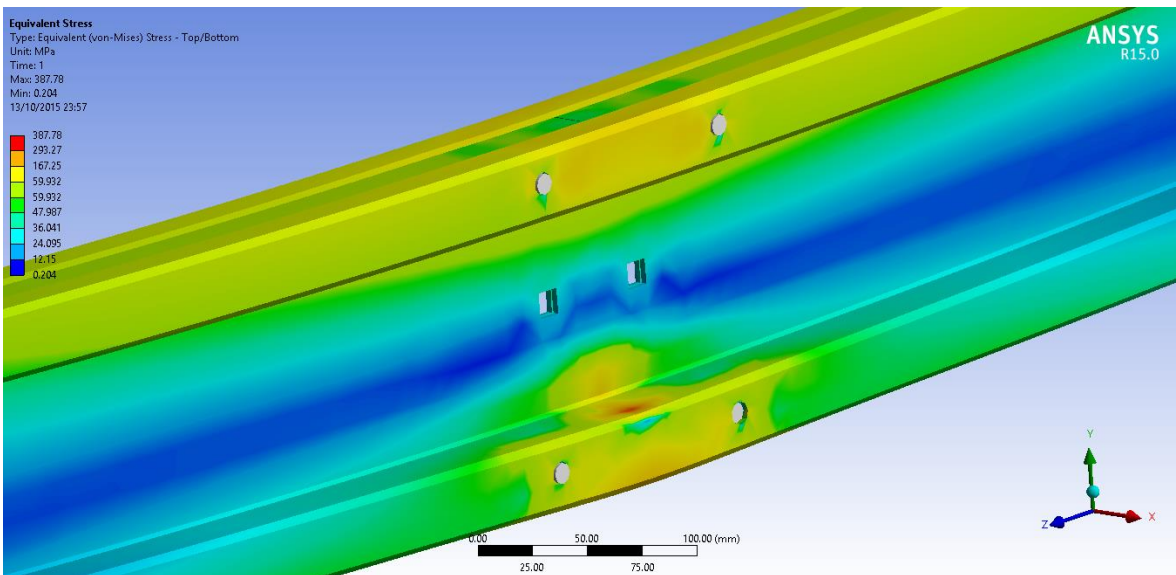


As tensões máximas foram observadas nas áreas de contacto entre as rodas do carro e as vigas assim como na área envolvente dos apoios, Figura 57.

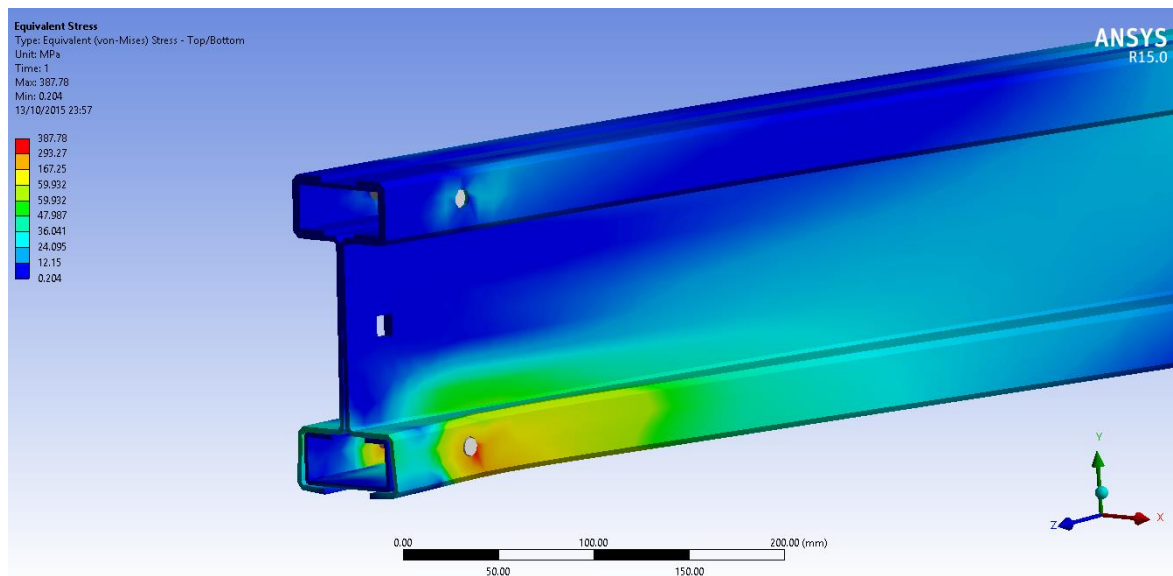


**Figura 57 Tensões equivalentes (Von Mises)**

As zonas de maior tensão podem ser visualizadas de forma mais pormenorizada na Figura 58 e Figura 59.

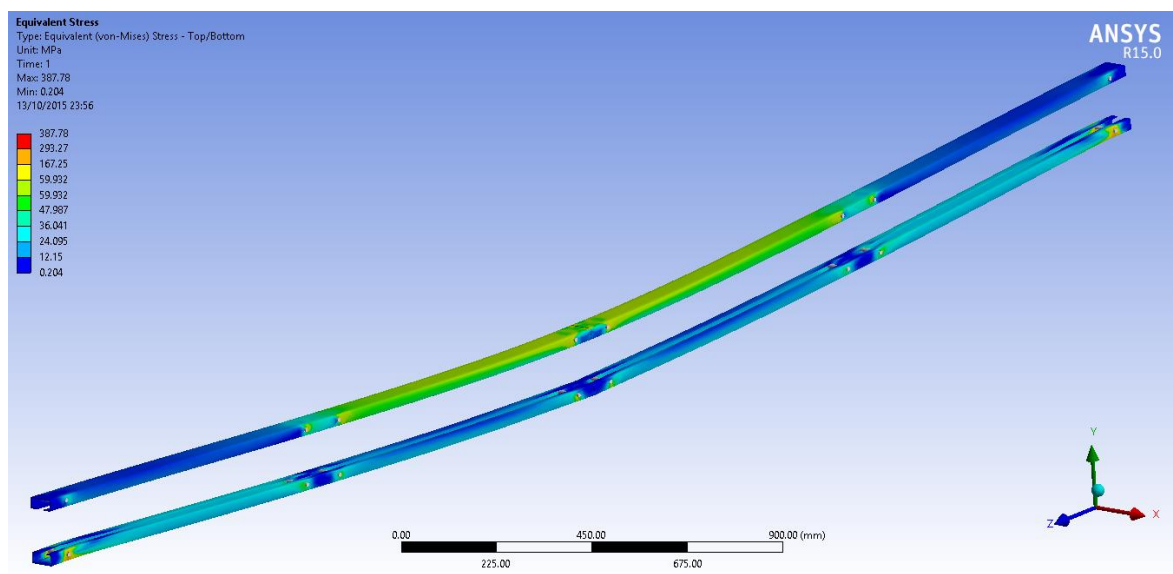


**Figura 58 Tensões equivalente máxima**



**Figura 59** Tensões equivalentes na área envolvente dos apoios

Na Figura 60, pode verificar-se a distribuição de tensões ao longo dos reforços.



**Figura 60** Tensões equivalentes nos reforços

# 4. Ensaaios experimentais

Após as simulações realizadas no *Ansys Workbench*, foi levado a cabo um ensaio experimental em laboratório, com o objetivo de avaliar experimentalmente o desempenho da viga *Flexcrane* e ao mesmo tempo validar as simulações computacionais.

Este ensaio teve lugar no laboratório de estruturas do departamento de engenharia civil do Isep, gentilmente disponibilizado pelo engenheiro Paulo Guedes, tendo sido utilizados os equipamentos do laboratório de mecânica aplicada.

## 4.1. Estrutura de ensaio

Fez parte deste trabalho o projeto e construção de uma estrutura que fosse capaz de servir de base para o ensaio das vigas compostas. Assim sendo, foram realizados cálculos para seleção dos vários elementos, feita a modelação dos mesmos assim como os desenhos técnicos para posteriormente ser realizada a construção. O desenvolvimento de toda esta estrutura foi realizada tendo em conta os elementos de fixação atualmente usados, nomeadamente apoios e carro, para que a montagem dos mesmos na estrutura fosse possível.

Porém, durante a realização deste trabalho surgiu a oportunidade de realizar os ensaios no laboratório do departamento de engenharia civil, evitando os custos de construção de uma

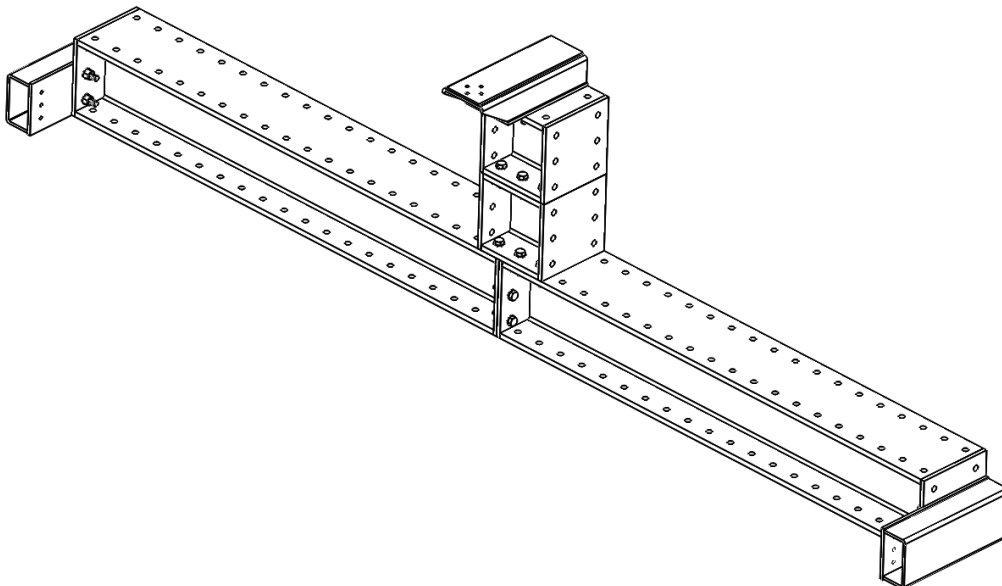
nova estrutura, tendo apenas sido necessário a construção de pequenos elementos para apoio das vigas.

O projeto da estrutura desenvolvida assim como todos os desenhos técnicos realizados para os vários componentes encontra-se no Anexo A.

Uma vez que a estrutura teria de ser construída com os elementos estruturais disponíveis no laboratório, houve a necessidade de encontrar uma configuração de montagem que fosse capaz de reproduzir da melhor forma possível os casos reais onde esta viga é utilizada e garantir uma rigidez suficientemente grande, quando comparada com a viga de ensaio, para que a sua deformação não interferisse nos resultados.

Assim sendo esta estrutura teria de alojar o comprimento total da viga, 3990 mm, ser capaz de ter um ponto de aplicação de carga a meio vão, altura para colocação do cilindro e célula de carga e todos os acessórios de ligação.

A melhor configuração encontrada está representada na Figura 61. Foi necessário, para além dos elementos disponíveis no laboratório, a construção de três peças para fixação dos dois apoios e do macaco hidráulico. Estas peças foram projetadas e construídas pelo engenheiro Vítor Neves.

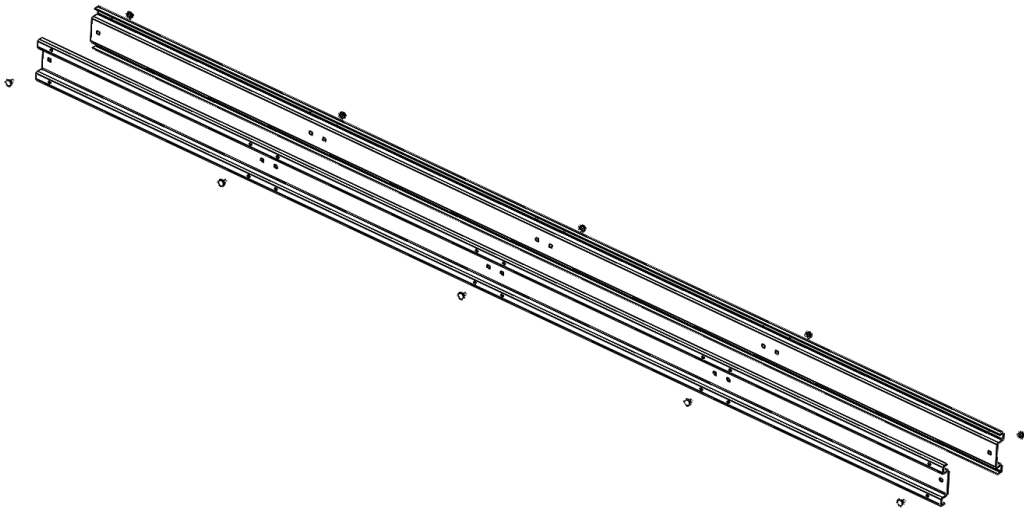


**Figura 61 Estrutura de ensaio**

As duas principais vigas da estrutura assim como os blocos colocados na vertical, são HEB 300, sendo unidas entre eles por um conjunto de seis parafusos M20 de classe 10.9. Os elementos de fixação, contruídos pelo engenheiro Vítor Neves, foram igualmente ligadas, no entanto apenas por quatro parafusos.

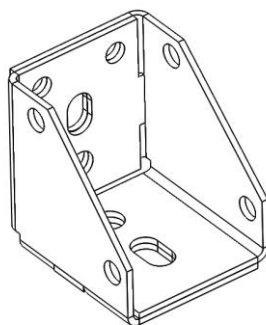
#### 4.2. Acessórios Flexcrane ensaiados

De entre as várias configurações analisadas numericamente, decidiu-se ensaiar a configuração I, sendo esta a mais utilizada pela empresa. Como já referido, está montagem é exclusivamente compostas pelas duas chapas laterais de 4000 mm, unidas através de ligações aparafusadas,



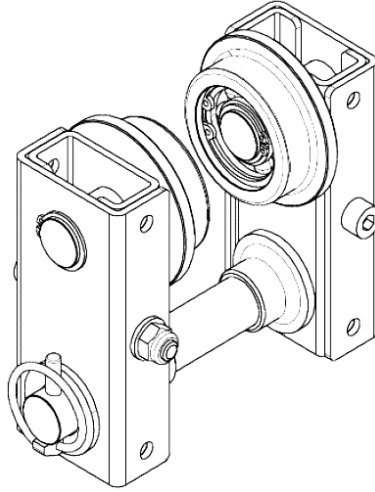
**Figura 62 Viga Flexcrane**

Para fixação da viga à estrutura utilizou-se os apoios Flexcrane, Figura 63, sendo estes os apoios utilizados na montagem da viga em situações reais,



**Figura 63 Apoio Flexcrane**

O carro Flexcrane foi também utilizado, pois desta forma aproximou-se ao máximo o ensaio da realidade e permitiu que este também fosse avaliado durante a realização do ensaio.



**Figura 64 Carro Flexcrane**

### **4.3. Equipamentos utilizados**

A estrutura anteriormente referida foi montada de modo a que fosse possível a montagem da viga *Flexcrane* e seus respectivos apoios, e todos os equipamentos já existentes no Isep, tais como: célula de carga HBM de 25 kN e cilindro de carga Larzep, representados na Figura 65 e Figura 66, respetivamente.



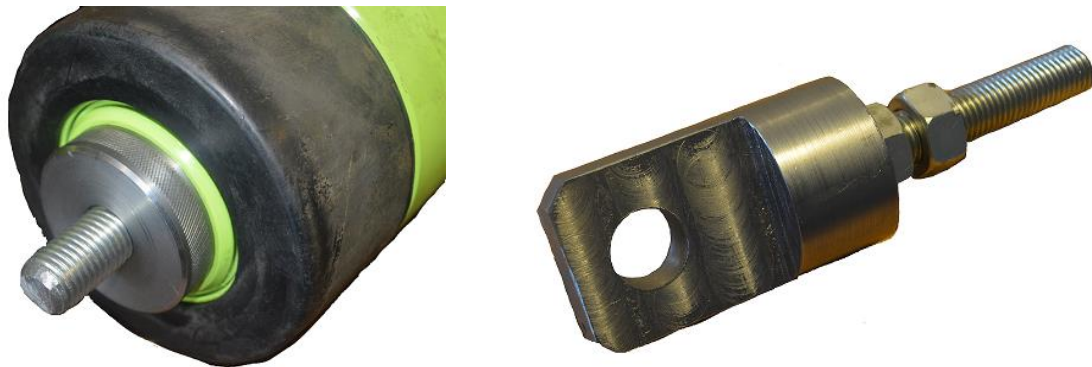
**Figura 65 Célula de carga HBM**

A célula de carga HBM utilizada tem uma capacidade máxima de carga de 25 kN e foi configurada de acordo com os dados do fabricante.



**Figura 66 Cilindro de carga e bomba Larzep**

Para além dos equipamentos já mencionados, houve necessidade de construir pequenas peças para conseguir a ligação entre os vários equipamentos. Para isso, recorreu-se à maquinaria disponível na oficina do departamento de engenharia mecânica, tendo sido fabricadas as peças nas figuras a baixo.



**Figura 67 Peças construídas na oficina**

Para obtenção dos resultados de deslocamento vertical da vida foi utilizado um sensor de deslocamento linear, Figura 68.




**Figura 68 – Sensor de deslocamento linear**

Este dispositivo foi calibrado segundo os dados do fabricante, e testado de forma manual de forma a garantir que a medição estava a ser realizada de forma correta.

**Tabela 2 – Dados de calibração**

| Dados de calibração    |            |
|------------------------|------------|
| Deslocamento           | 100.000 mm |
| Output                 | 5.228 mV/V |
| Erro máximo de leitura | 0.10%      |
| Testado a 20° C        |            |

Os extensómetros utilizados no ensaio experimental foram da marca HBM, estando de acordo com as especificações abaixo mencionadas. Foi usado um total de cinco extensómetros para avaliação da tensão em pontos pré definidos da viga Flexcrane.

|  Dehnungsmeßstreifen<br>Strain Gauges<br>Jauges d'extensométrie |         |        |  |     |
|--|---------|--------|--|-----|
| Widerstand<br>Resistance<br>Résistance   | 120 [Ω] | + 0.35 |  | [%] |
|  |         | - 0.35 |  | [%] |
| k-Faktor<br>Gauge factor<br>Facteur k  | 2,08    | ± 1    |  | [%] |
| Querempfindlichkeit<br>Transverse Sensitivity<br>Sensibilité transverse  |         | -0.1   |  | [%] |
|  |         | -      |  | [%] |

**Figura 69 – Sensor de deslocamento linear**

Para recolha dos vários resultados, deformação, força e deslocamento foram usados dois equipamentos Vishay, modelo P3. Este é um equipamento muito versátil e de fácil utilização que permite a recolha de dados de forma imediata. Durante o ensaio foi necessário usar dois equipamentos uma vez que estes estão limitados a quatro canais de entrada.



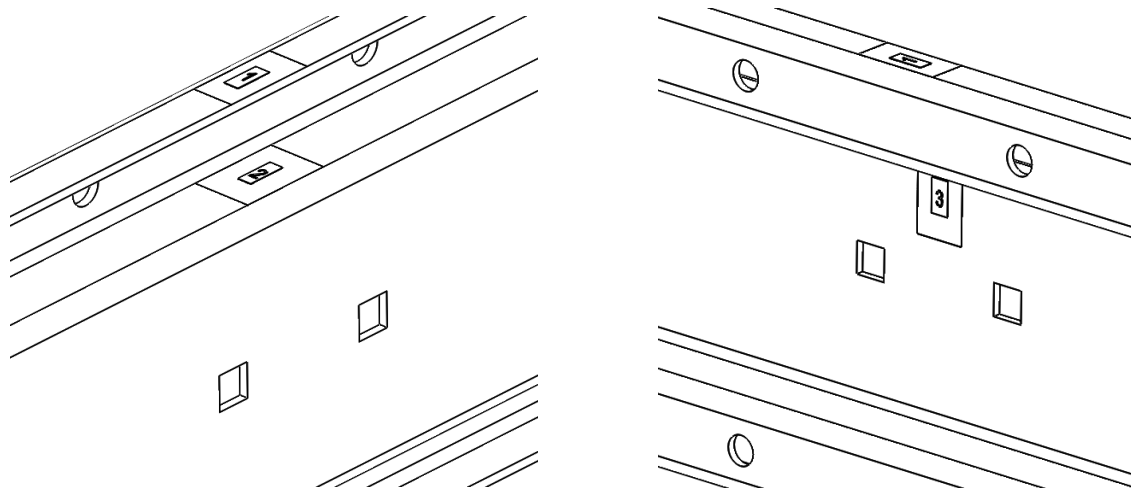
**Figura 70 – Equipamento Vishay P3**

#### **4.4. Instrumentação da viga**

Com a colagem dos extensómetros pretende-se perceber a distribuição de tensões ao longo da viga e ao mesmo tempo registar essa informação para posterior comparação com as simulações efetuadas no *Ansys Workbench*. A colagem foi realizada nos locais onde se verificou maiores tensões nas simulações numéricas.

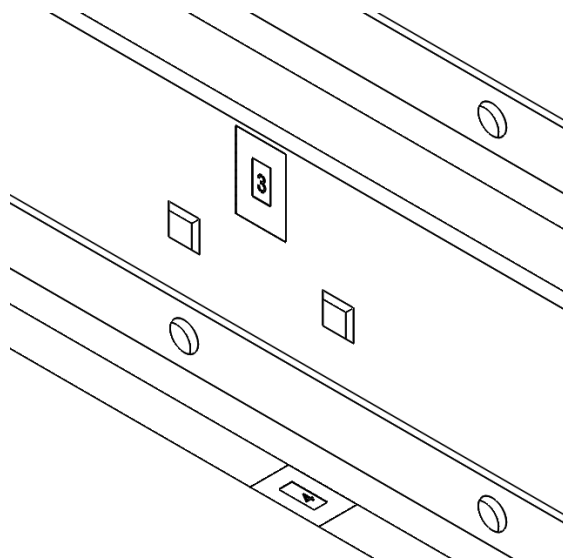
Todos extensómetros foram devidamente identificados através de numeração, 1 a 5, conforme será evidenciado nas figuras seguintes. Essa numeração foi tida em conta posteriormente no registo de valores durante o ensaio experimental.

O extensómetro 1 foi colado a meio vão da viga na parte exterior do baso superior, local onde se preveem de acordo com as simulações numéricas elevadas tensões de tração no material. Colado na parte interior do banzo, está o extensómetro 2, este local foi seleccionado com a intenção de registar as tensões localizadas devido à presença da roda do outro lado da chapa.



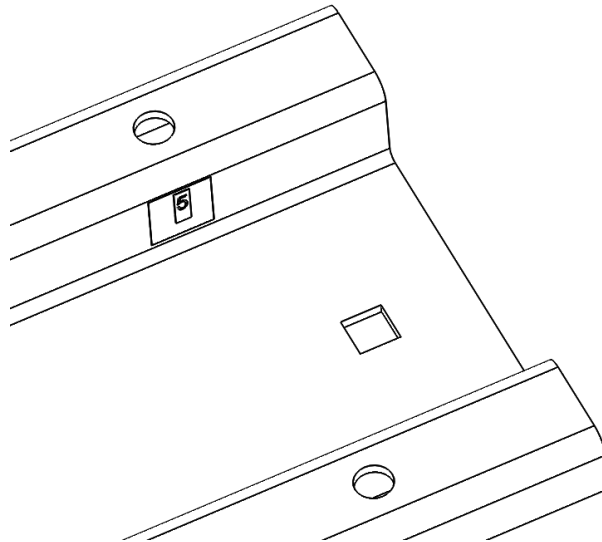
**Figura 71 Representação esquemática do local de colagem dos extensómetros 1, 2 e 3**

O extensómetro 4 colou-se no banzo inferior da viga, de modo a que seja possível registar a tensão de compressão a meio vão da viga.



**Figura 72 Representação esquemática do local de colagem dos extensómetros 3 e 4**

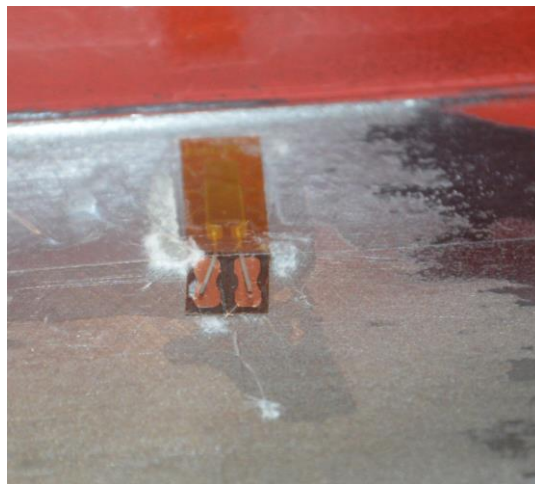
Junto ao furo de fixação da viga ao apoio, foi colado o extensómetro 5. Neste local pretende-se registar as tensões localizadas resultantes da ligação entre a viga e o apoio.



**Figura 73** Representação esquemática do local de colagem do extensómetro 5

A colagem dos extensómetros requereu uma pré remoção da tinta das vigas para que assim fosse possível a colagem do extensómetro diretamente no metal. Esta colagem foi feita de forma muito cuidada e utilizando todas as técnicas indicadas pela marca HBM. Este trabalho teve a direta colaboração do engenheiro Fernando Ferreira e o engenheiro Gustavo.

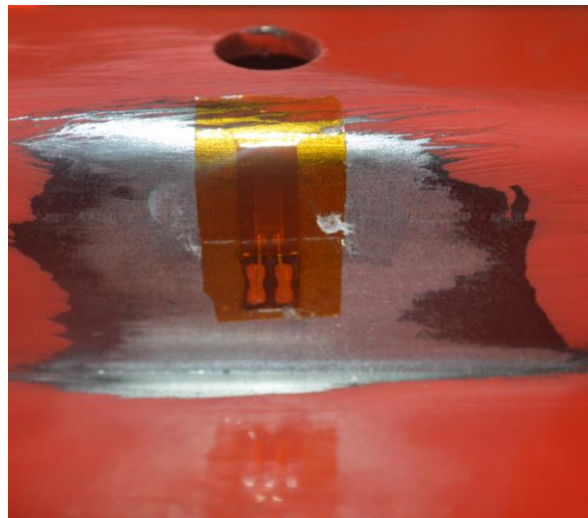
Nas figuras a baixo pode-se ver os extensómetros devidamente colados, no entanto ainda sem as ligações realizadas.



**Figura 74** Extensómetro 2, colado na alma da viga



**Figura 75 Extensómetro 1, colado no banzo superior da viga**



**Figura 76 Extensómetro 5, colado junto ao furo de fixação ao apoio**

#### **4.5. Esquema de montagem do ensaio**

Uma vez concluída a estrutura de ensaio, Figura 61, realizou-se a montagem de todos os elementos conforme Figura 77.

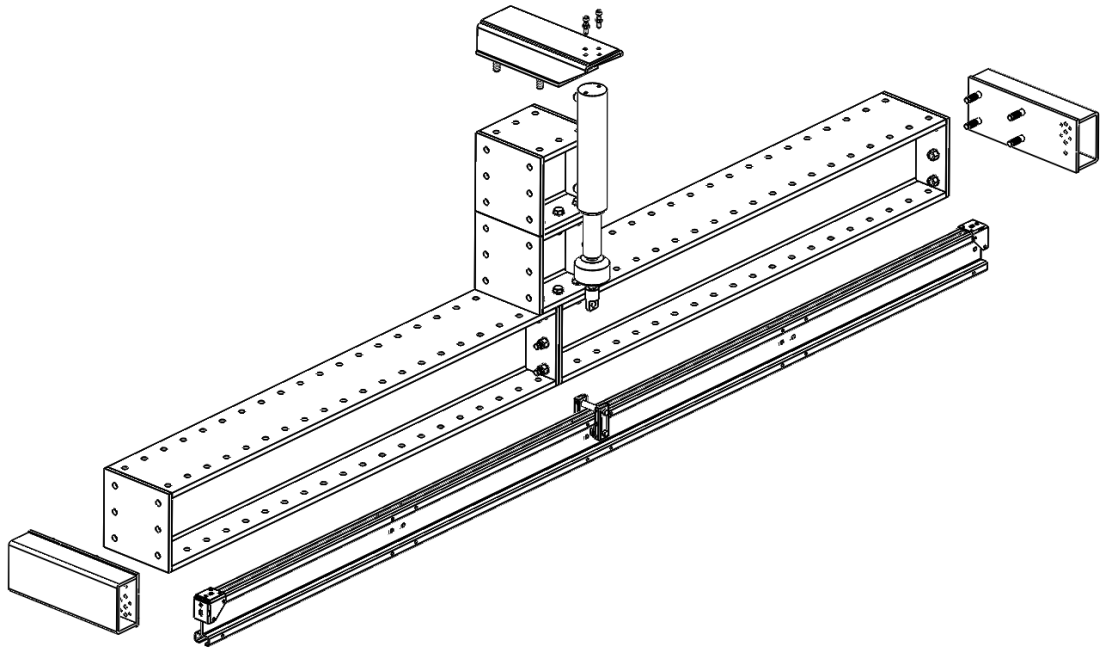


Figura 77 – Esquema de montagem

#### 4.6. Registo de resultados

Durante o ensaio experimental fez-se o registo da carga aplicada, deslocamento vertical a meio vão e da deformação em cada um dos extensómetros. Sendo a carga máxima da viga a ensaiar de 7500 N e a carga de admissível de utilização de 5000 N, foi aplicada carga lentamente registando valores a cada 1000 N, aproximadamente.

Desta forma obteve-se os seguintes valores para o primeiro carregamento:

Tabela 3 – Resultados primeiro carregamento

| Força (N) | Deslocamento (mm) | Deformação ( ) |        |        |        |        |
|-----------|-------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|
|           |                   | Ext. 1         | Ext. 2 | Ext. 3 | Ext. 4 | Ext. 5 |
| 3.00      | -0.056            | 0              | 0      | 0      | 0      | 1      |
| 1026.00   | 1.360             | 136            | 187    | 102    | -89    | 25     |
| 2006.00   | 2.890             | 246            | 333    | 196    | -171   | 56     |
| 3007.00   | 4.509             | 351            | 464    | 288    | -253   | 93     |
| 3996.00   | 6.067             | 454            | 602    | 376    | -333   | 131    |
| 5000.00   | 7.710             | 558            | 747    | 463    | -416   | 157    |
| 6000.00   | 9.406             | 663            | 906    | 548    | -497   | 178    |
| 7040.00   | 11.230            | 772            | 1099   | 625    | -580   | 205    |
| 7500.00   | 12.040            | 824            | 1200   | 661    | -620   | 219    |

**Tabela 4 – Resultados segundo carregamento**

| Força (N) | Deslocamento (mm) | Deformação |        |        |        |        |
|-----------|-------------------|------------|--------|--------|--------|--------|
|           |                   | Ext. 1     | Ext. 2 | Ext. 3 | Ext. 4 | Ext. 5 |
| 0.00      | 0.117             | 4          | 63     | -10    | -4     | 15     |
| 1005.00   | 1.500             | 140        | 242    | 91     | -93    | 41     |
| 2020.00   | 3.094             | 253        | 386    | 189    | -177   | 77     |
| 3035.00   | 4.740             | 360        | 527    | 284    | -260   | 114    |
| 4010.00   | 6.266             | 462        | 666    | 371    | -340   | 146    |
| 5020.00   | 7.909             | 565        | 814    | 457    | -421   | 170    |
| 6010.00   | 9.557             | 668        | 968    | 543    | -502   | 189    |
| 7020.00   | 11.260            | 774        | 1132   | 625    | -584   | 214    |
| 7520.00   | 12.130            | 826        | 1224   | 666    | -625   | 228    |

Fazendo uma rápida comparação entre os resultados obtidos nas simulações numéricas e os valores do ensaio experimental verificou-se uma grande discrepância entre os valores verificados do deslocamento vertical a meio vão para a mesma carga aplicada.

Depois de realizados novos carregamentos para tentar perceber o que poderia estar a afetar os resultados, reparou-se numa considerável torção da viga principal da estrutura de ensaio. Apesar das dimensões avantajadas do perfil HEB 300 utilizado, este possui pouca rigidez à torção uma vez que é um perfil aberto. Sendo o ponto de aplicação da carga deslocado do centro da viga esta sofria torção, influenciado diretamente os resultados obtidos.

A solução encontrada para anular o efeito dessa torção nos resultados obtidos foi fazer novos carregamentos medindo o deslocamento dos apoios devido à torção da viga e medindo o deslocamento a meio vão. Desta forma obteve o deslocamento vertical a meio vão relativamente aos apoios.

Na tabela seguinte mostram-se os resultados obtidos para esta nova ronda de leituras.

**Tabela 5 – Resultados terceiro carregamento**

| <b>Força (N)</b> | <b><math>\Delta y</math> Apoio Direito (mm)</b> | <b>Força (N)</b> | <b><math>\Delta y</math> Apoio Esquerdo (mm)</b> | <b><math>\Delta y</math> Apoio Médio (mm)</b> | <b>Força (N)</b> | <b><math>\Delta y</math> Meio Vão (mm)</b> | <b><math>\Delta y</math> Meio Vão – Relativo (mm)</b> |
|------------------|---|------------------|--|---|------------------|--|---|
| 1.0              | -0.006  | 10.0             | -0.014   | -0.013  | 21               | 0.064                                      | 0.074   |
| 1064.0           | 0.290   | 1019.0           | 0.310  | 0.300   | 995              | 1.7  | 1.400   |
| 1998.0           | 0.560   | 2011.0           | 0.645  | 0.603   | 1996             | 3.29                                       | 2.688   |
| 3008.0           | 0.850   | 3034.0           | 0.950  | 0.900   | 2972             | 4.85                                       | 3.950   |
| 3995.0           | 1.130   | 4003.0           | 1.260  | 1.195   | 3990             | 6.42                                       | 5.225   |
| 4999.0           | 1.460   | 5008.0           | 1.620  | 1.540   | 5010             | 8.057                                      | 6.517   |
| 6015.0           | 1.800   | 6002.0           | 2.000  | 1.900   | 5995             | 9.65                                       | 7.750   |
| 7000.0           | 2.140   | 6988.0           | 2.360  | 2.250   | 6996             | 11.31                                      | 9.060   |
| 7513.0           | 2.314   | 7502.0           | 2.550  | 2.432   | 7505             | 12.15                                      | 9.718   |

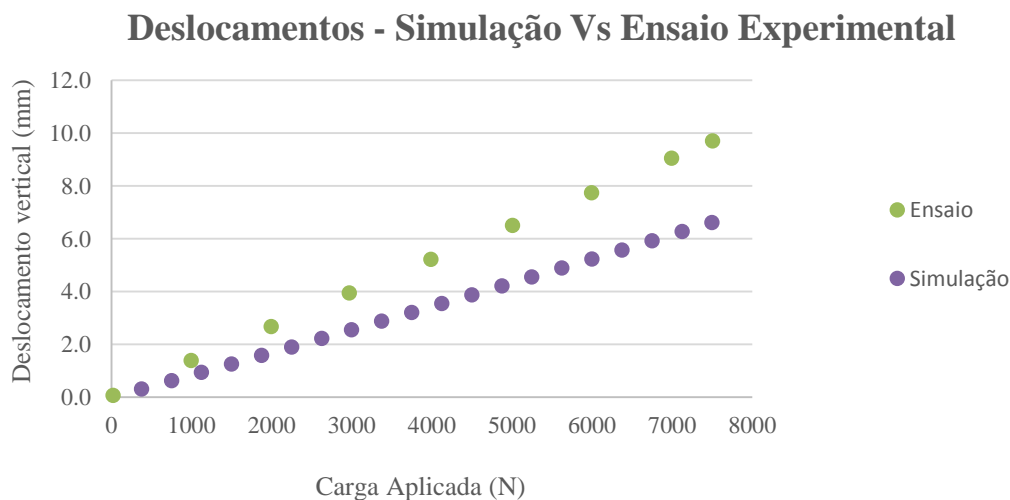
Para evitar outros possíveis erros de medida de deslocamentos, e ao contrário do primeiro ensaio, o sensor de deslocamento vertical foi apoiado no solo e não em cima da viga principal da estrutura de ensaio.

# 5. Análise de Resultados

Neste capítulo será feita a análise de resultados, assim como a comparação dos resultados obtidos por via numérica e experimental.

## 5.1. Deslocamentos Verticais

Durante a realização do ensaio foram registados os valores de deslocamento vertical a meio vão, por cada 1000 N de carga aplicada. Na simulação são feitos registos de deslocamento a cada *step*, neste caso com a duração de 0.05 s.



**Figura 78 – Deslocamentos verticais**

Verificou-se que os deslocamentos verticais verificados experimentalmente são consideravelmente maiores que os obtidos na simulação computacional

O Figura 78 abaixo demonstra a discrepância entre os dois valores para valores de carregamentos idênticos.

Esta diferença entre resultados estará diretamente relacionada com a condição de apoio da viga, uma vez que existe uma incoerência entre a condição de apoio na simulação e no ensaio experimental.

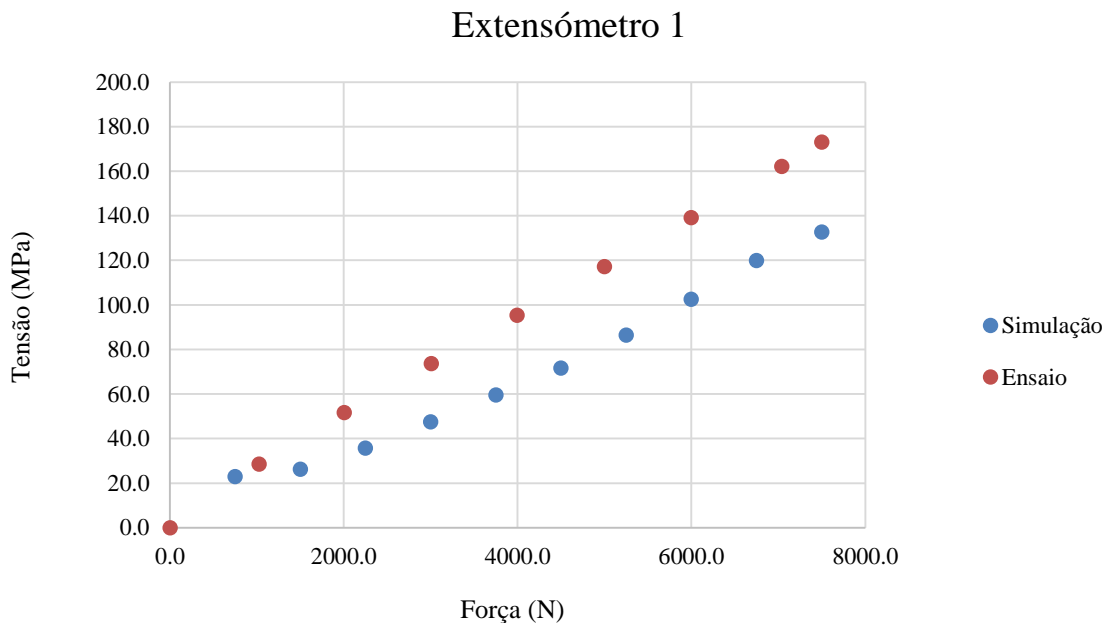
## 5.2. Tensões Direcionais

Tal como o deslocamento vertical, foi feito o registo das deformações durante o ensaio experimental a cada 1000 N de carga plicada.

Tendo em conta que:

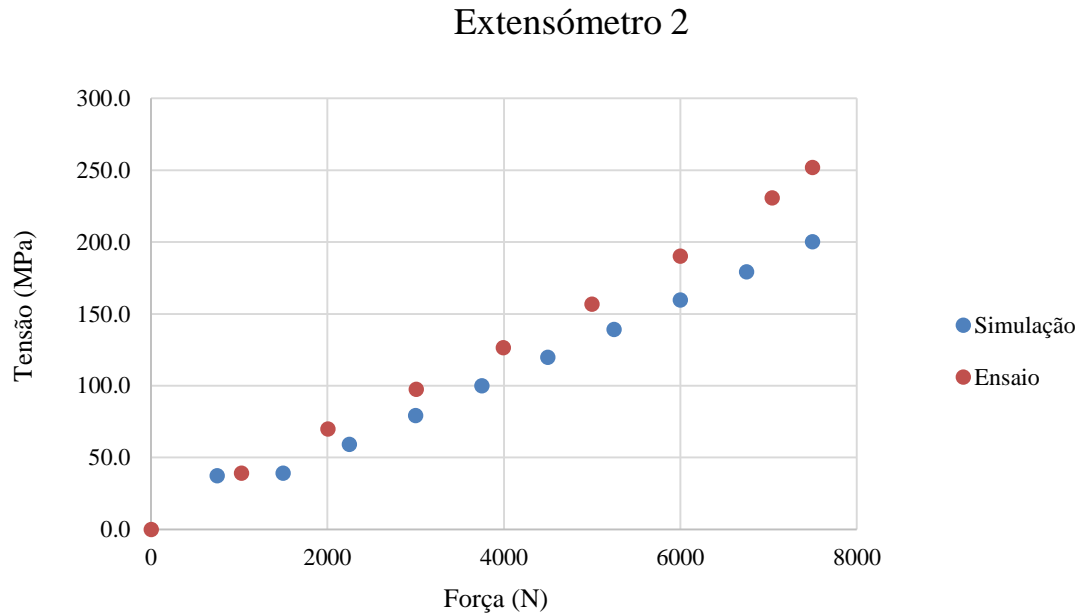
$$\sigma = \varepsilon \times E$$

E sendo o módulo de elasticidade do material,  $E=210$  GPa, realizou-se o calculo para obtenção das tensões. A extração dos valores da simulação numérica foi feita através da função *probe*, de forma manual, para cada 0.1 s.

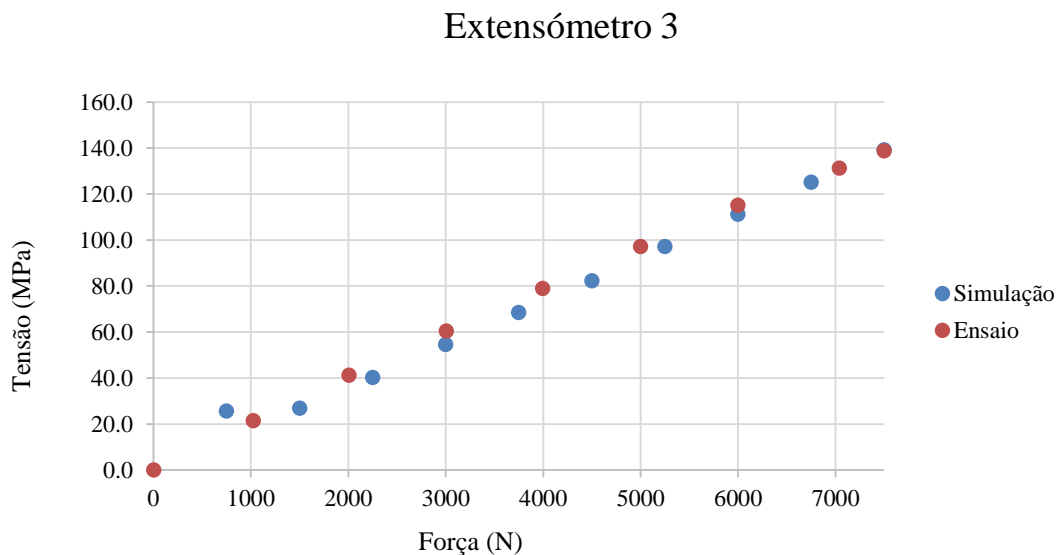


**Figura 79 – Tensões ensaio experimental Vs Simulação**

A Figura 79 faz a comparação entre resultados obtidos através da simulação e os experimentais. Verifica-se uma significativa discrepância de valores, em especial neste extensômetro, que poderá dever-se a um problema na colagem do mesmo.



**Figura 80 – Tensões ensaio experimental Vs Simulação**



**Figura 81 – Tensões ensaio experimental Vs Simulação**

### Extensómetro 4

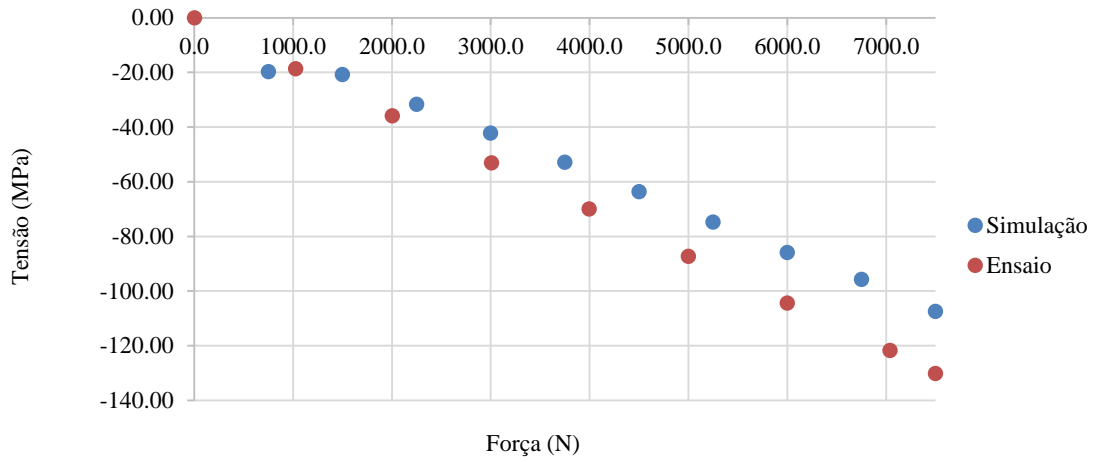


Figura 82 – Tensões ensaio experimental Vs Simulação

### Extensómetro 5

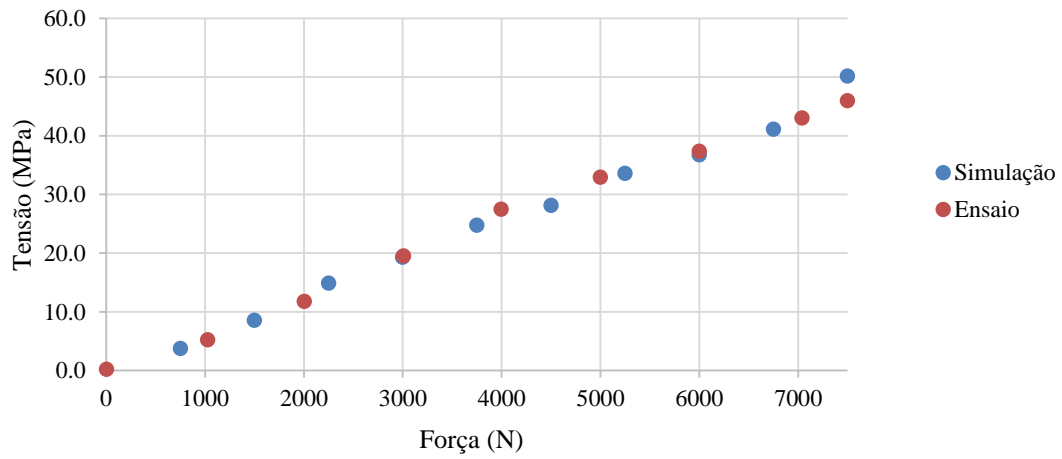


Figura 83 – Tensões ensaio experimental Vs Simulação

## 6. Conclusões

O desempenho das vigas Flexcrane superaram largamente as expectativas no que diz respeito à capacidade de carga no regime elástico. Os acessórios da marca envolvidos no ensaio experimental também excederam de uma forma muito evidente a carga máxima para o qual foram concebidos.

No entanto, sendo este tipo de estruturas utilizados em movimentações de carga de forma manual, a flexa máxima, nunca poderá ultrapassar a razão  $l/500$ .

Apesar do *software* utilizado apresentar uma interface muito intuitiva e de fácil aprendizagem, foi necessário um grande número de testes numéricos numa tentativa de perceber que tipo de adaptações é necessário fazer para que o programa produza resultados pertinentes para a análise que se pretende.

Apesar da obtenção de resultados interessantes, ficam por fazer alguns possíveis melhoramentos aos ensaios, quer experimentais quer numéricos. Uma estrutura de ensaio suficientemente rígida que permitisse realizar o ensaio experimental garantindo uma maior estabilidade nos apoios levaria a resultados mais próximos da realidade. De qualquer forma, ficaram traçadas bases importantes para no futuro, e ainda no âmbito deste projeto, darem-se novos passos para a realização de outros tipos de ensaio e para outras configurações de montagem utilizadas.

## **6.1. Trabalhos futuros**

Parte do trabalho futuro a desenvolver dever-se-á prender essencialmente nas condições de apoio a que esta viga poderá estar sujeita.

Novos produtos da empresa Flexcrane poderão também ser alvo de estudo, nomeadamente os perfis curvos.

## Anexo A. Estrutura de Ensaio

Durante a realização deste trabalho foi realizado o projeto de uma estrutura que seja capaz de solicitar as vigas *Flexcrane* nas diferentes configurações. Pretende-se ainda que a estrutura tenha um desenho que permita a utilização de alguns equipamentos já existentes no Isep, tais como: célula de carga HBM de 250 kN e cilindro de carga Larzep representados na Figura 84 e Figura 85 respetivamente:

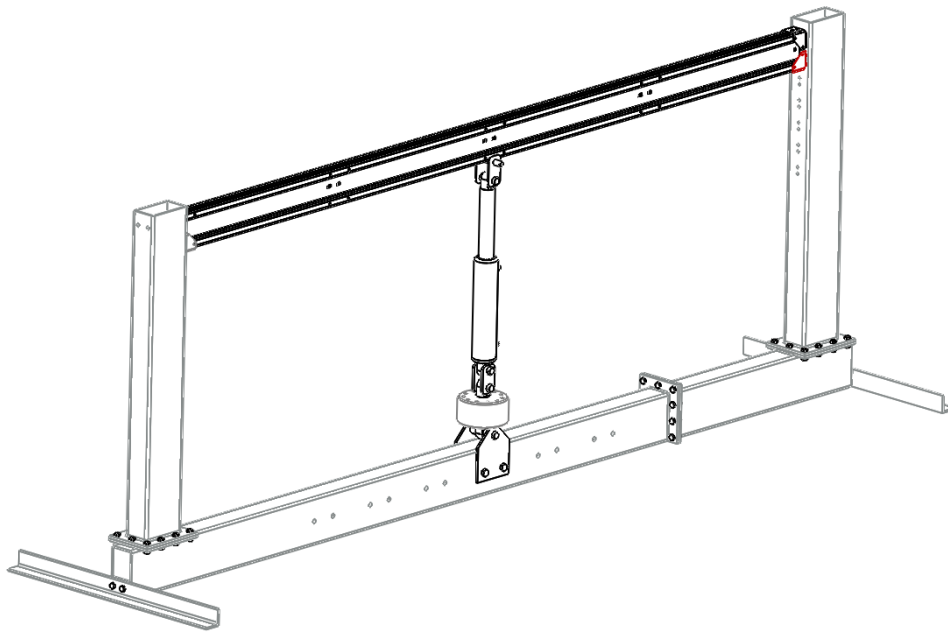


**Figura 84** Figura célula de carga HBM



**Figura 85** Figura cilindro de carga Larzep

De acordo com o referido anteriormente foi encontrada a seguinte solução que satisfaz os requisitos impostos, Figura 86.



**Figura 86 Conjunto para ensaio**

A solução encontrada para a estrutura de ensaio as vigas *Flexcrane* podem ser configuradas para: flexão em três pontos com carregamento a meio vão; flexão em três pontos com carregamento descentrado e flexão da viga encastrada numa das extremidades. A estrutura de ensaio projetada está adaptada para a utilização dos apoios de montagem *Flexcrane*, permitindo a montagem de um ou dois apoios em cada extremidade, obtendo a configuração em apoio duplo ou encastramento. O dispositivo pode ainda ser configurado para fazer flexão a uma viga bi-encastrada.

Como se pode observar na Figura 86, a estrutura é constituída por perfis de secção retangular aparafusados, desta forma pretende-se um fácil transporte e armazenamento. A estrutura pode ainda ser utilizada em pórtico, para prevenir danos na célula de carga e macaco de carga caso haja rotura da viga *Flexcrane*.

A estrutura foi desenhada de forma a suportar a carga que lhe são exigidas sem estar fixa ao solo ou a outras estruturas auxiliares. Este tipo de estruturas em carga poderia sofrer deformações fora do plano se os perfis escolhidos não forem suficientemente rígidos à torção, isto justifica a opção por perfis tubulares em detrimento dos perfis em I ou H.

Como já referido a escolha dos perfis tubulares de secção quadrada ou retangular confere maior rigidez à estrutura e também torna a sua construção simples.

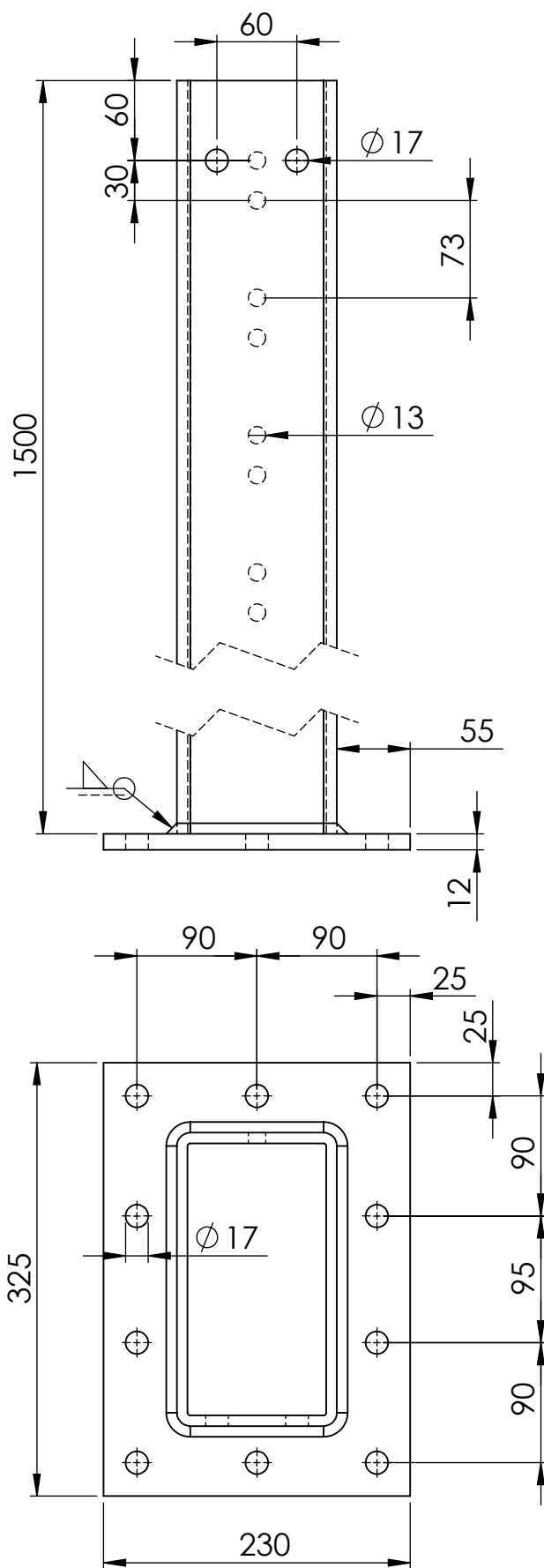
Para garantir uma reserva de resistência e uma rigidez adequada tomou-se como princípio que o momento de inércia das vigas da estrutura de ensaio fosse três a quatro vezes superior ao momento de inércia da viga a ensaiar na sua configuração mais resistente, ou seja com os reforços interiores montados, Figura 15.

Consultando uma tabela de fornecedores a viga se secção 220x120x8 mm, com um momento de inércia de  $32 \times 10^6 \text{ mm}^4$  relativamente ao eixo de maior inércia e  $12.3 \times 10^6 \text{ mm}^4$  relativamente ao eixo de menor inércia cumpre com os requisitos anteriormente impostos.

Para além dos elementos estruturais da estrutura foi necessário também contruir vários acessórios de ligação para os diferentes dispositivos envolvidos no ensaio.

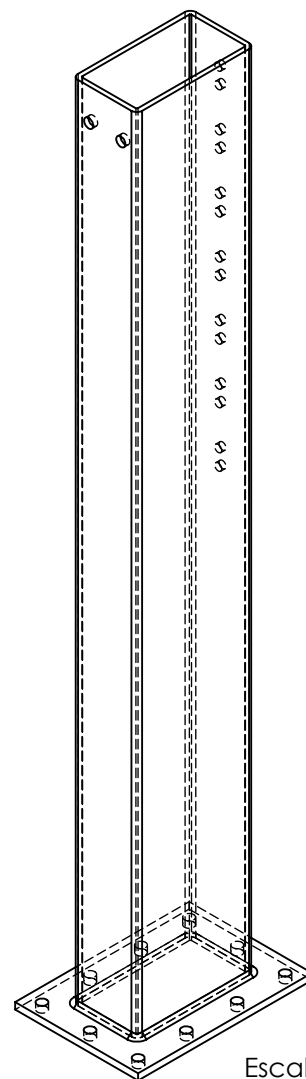
As ligações aparafusadas foram devidamente calculadas para garantir a transmissão de esforços entre os diferentes elementos. Uma vez limitados pela dimensão do transporte, foi necessário a divisão da viga inferior obrigando assim a mais uma ligação aparafusada e respetivamente o seu cálculo.

## Anexo B. Desenhos técnicos




## Dimensões do perfil:

Altura: 220 mm  
 Largura: 120 mm  
 Espessura: 8 mm



Escala: 1:5

Quantidade a fabricar:  
 2 Unidades

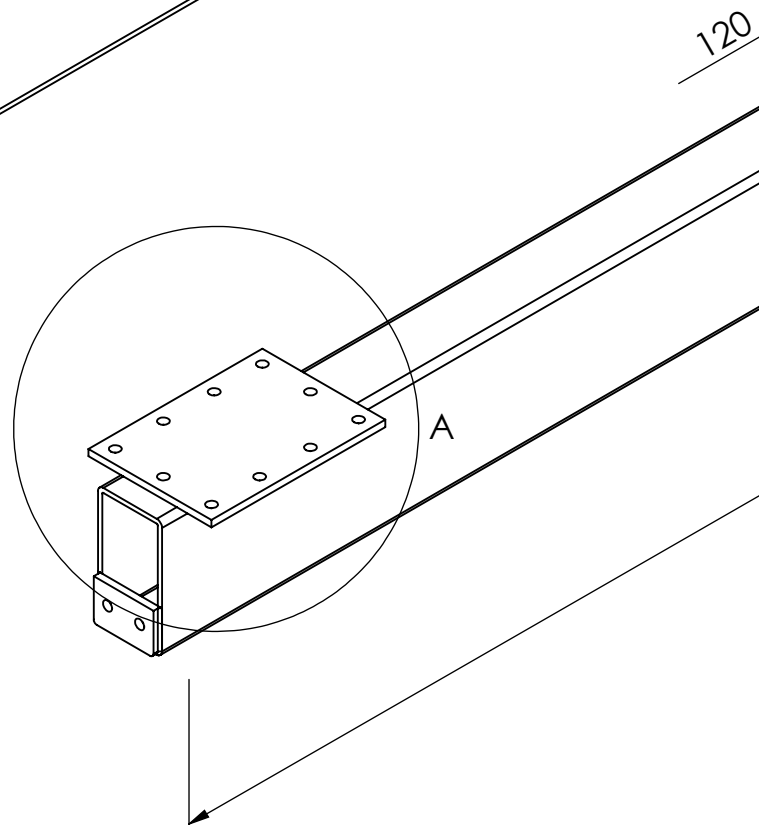
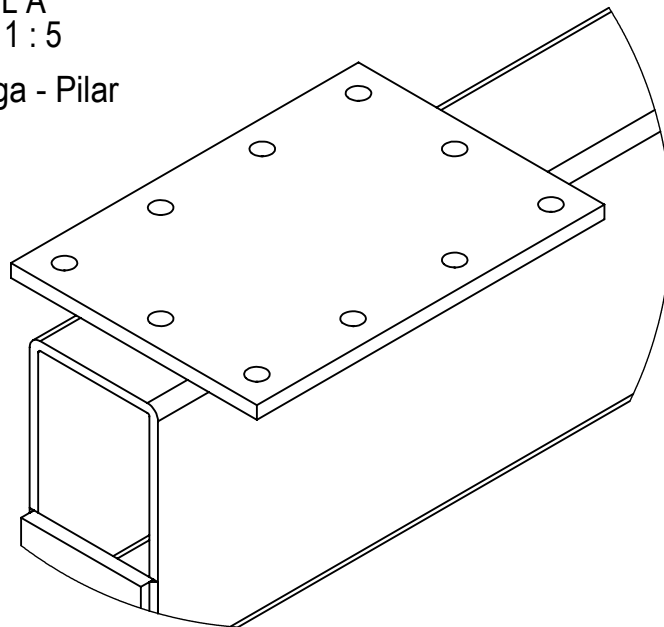
|   |            |                |                   |          |
|---|------------|----------------|-------------------|----------|
| Autor:  | Data:      | Material:      | Título:           |          |
| Hugo Gouveia  | 07/06/2015 | S355 J2 H      | Pilar [220x120x8] |          |
|  Instituto Superior de Engenharia do Porto |            | Tolenciamento: | Des. N.º          | pt       |
|   |            |                | Escala: 1:5       | Revisão: |

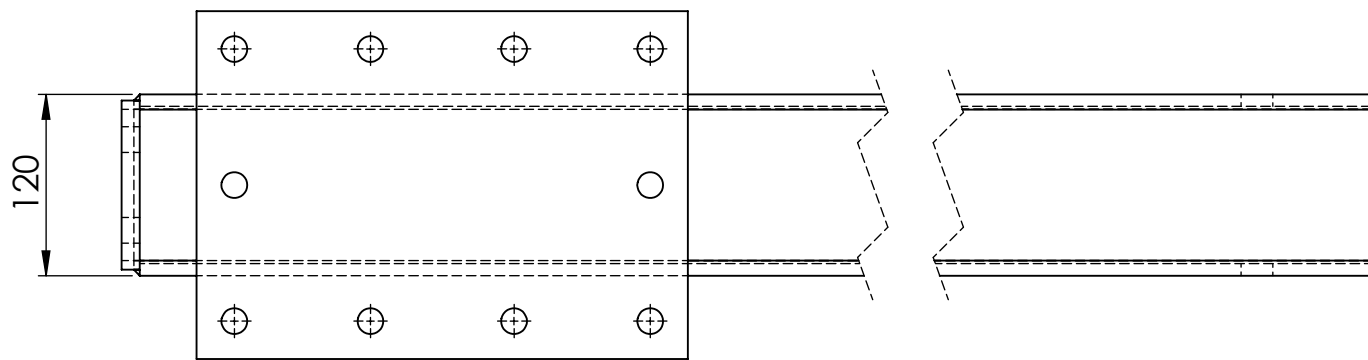
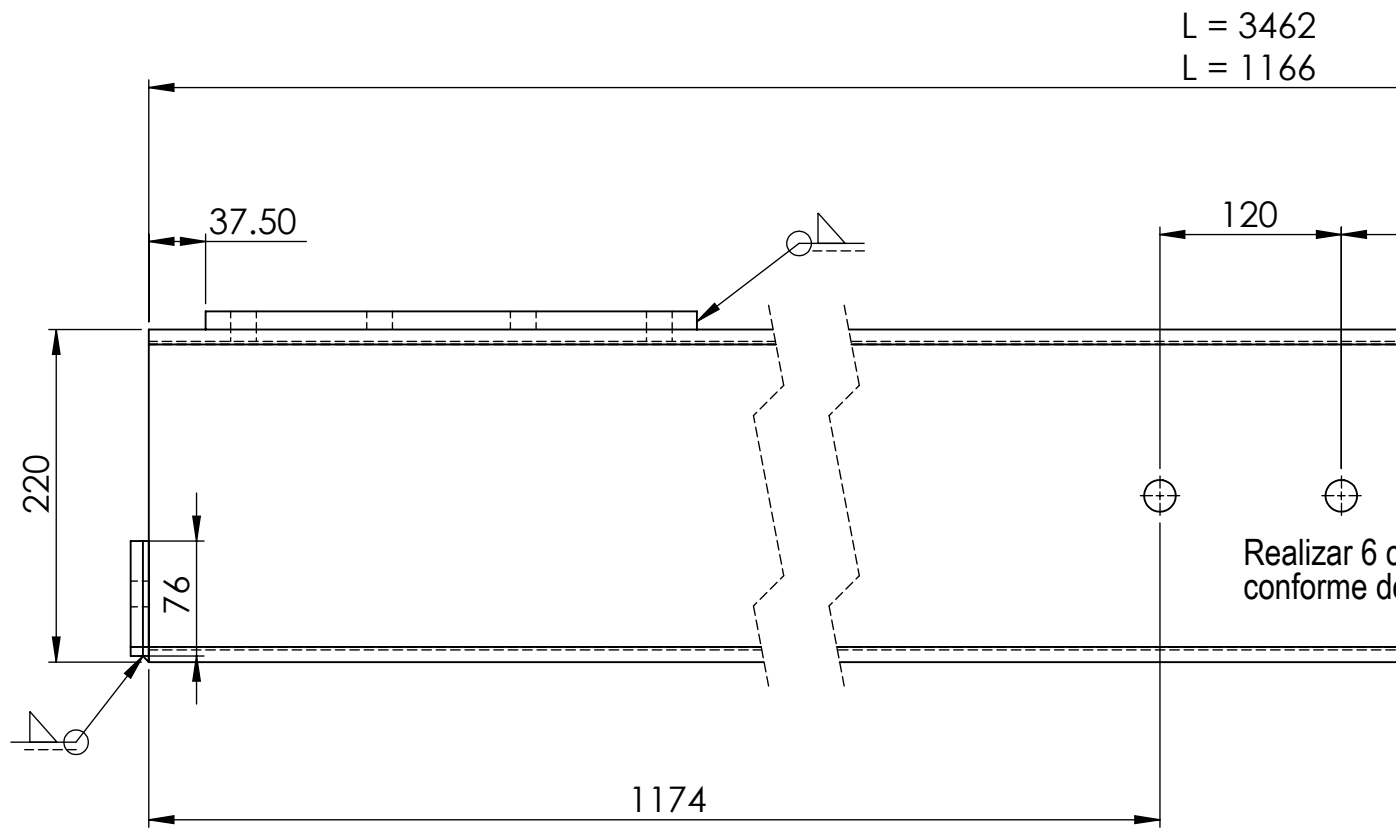
## Dimensões do perfil:

Altura: 220 mm  
Largura: 120 mm  
Espessura: 8 mm

DETAIL A  
SCALE 1 : 5

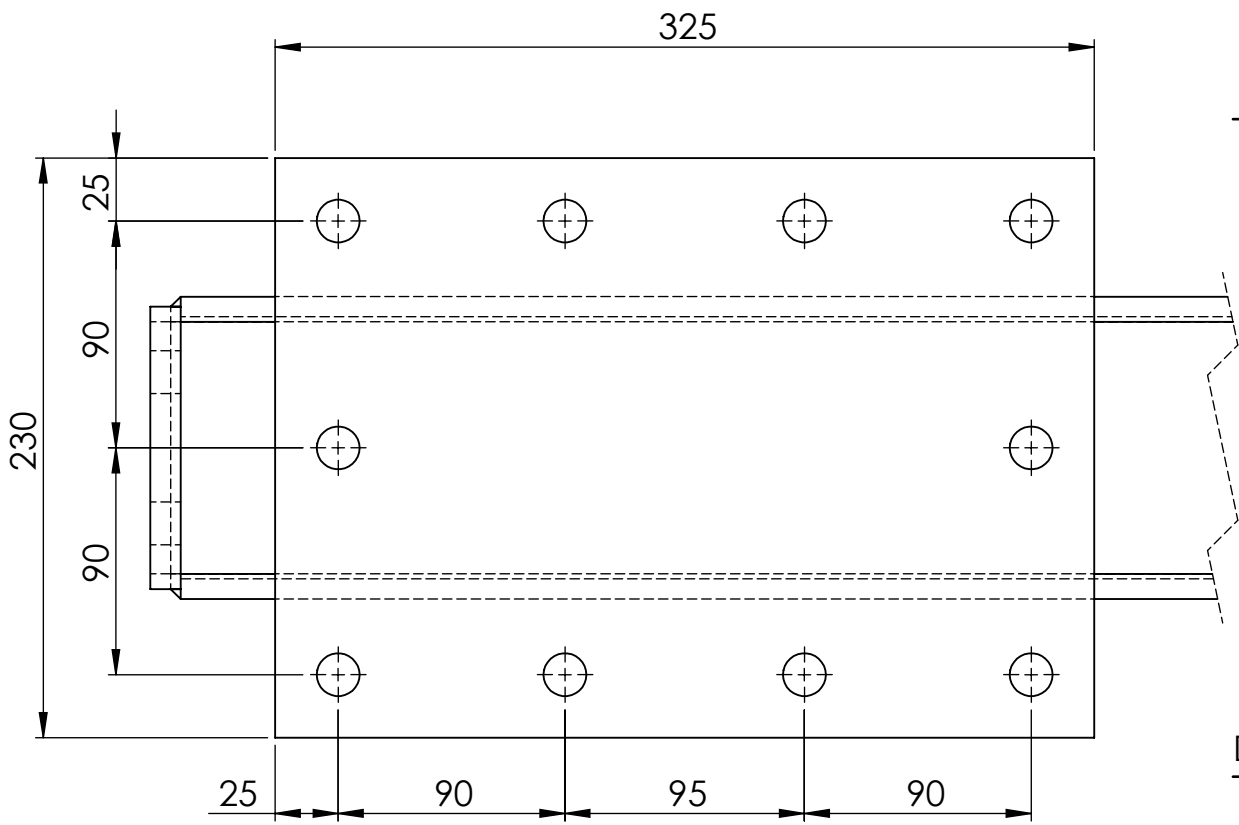
Ligação Viga - Pilar



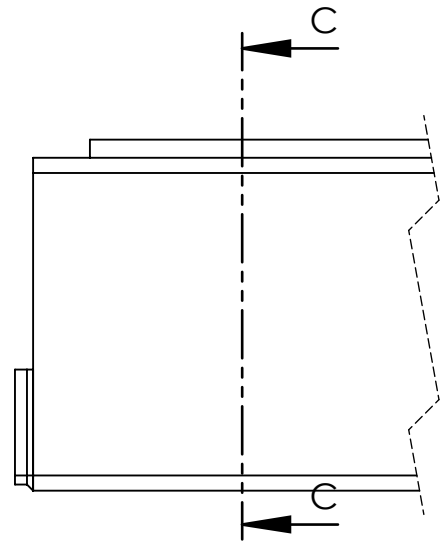
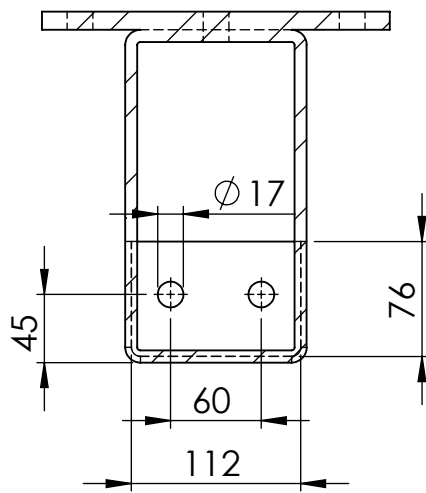


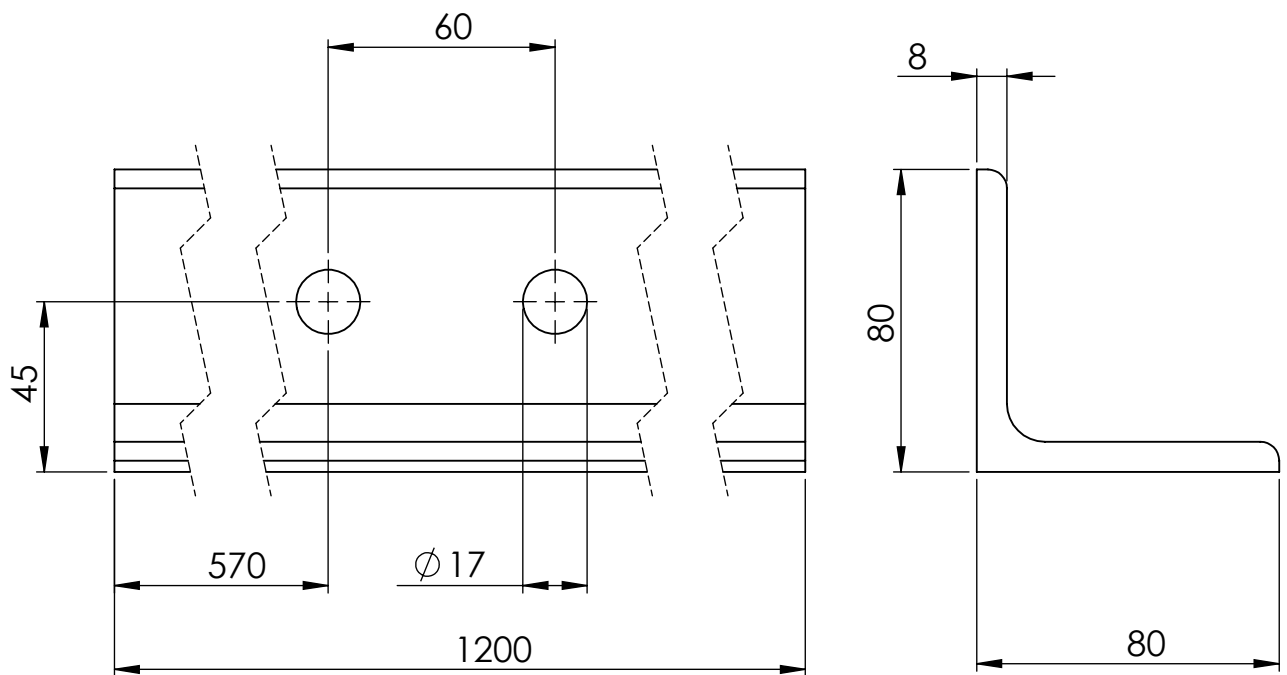
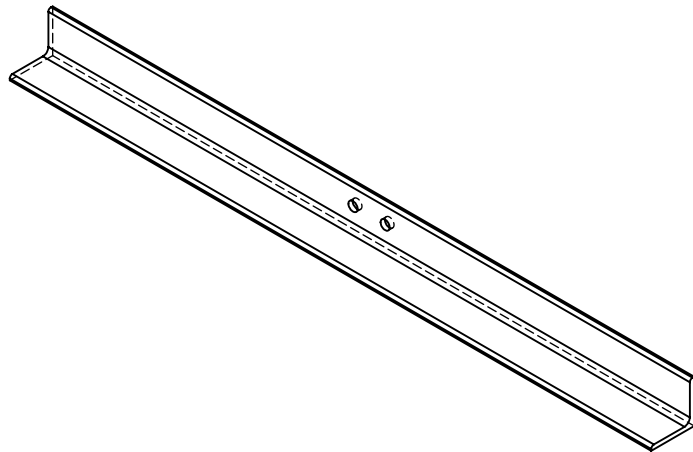
Ligação Viga - Pilar I

Ligação Viga - Pilar




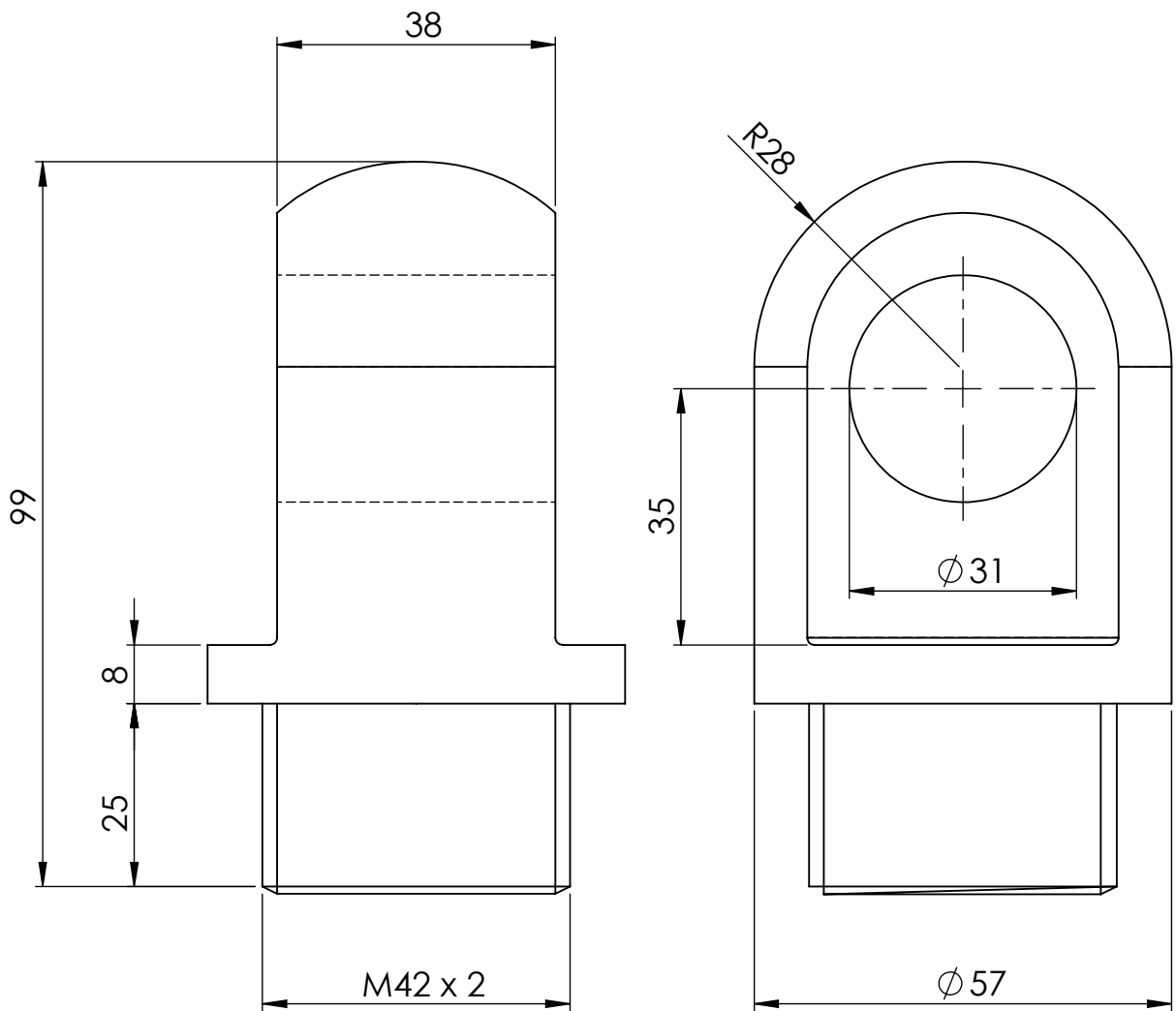
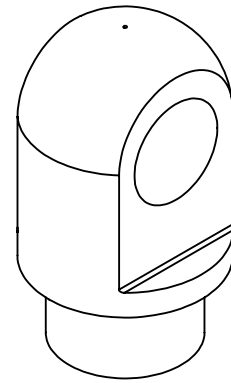
SECTION C-C  
SCALE 1 : 5






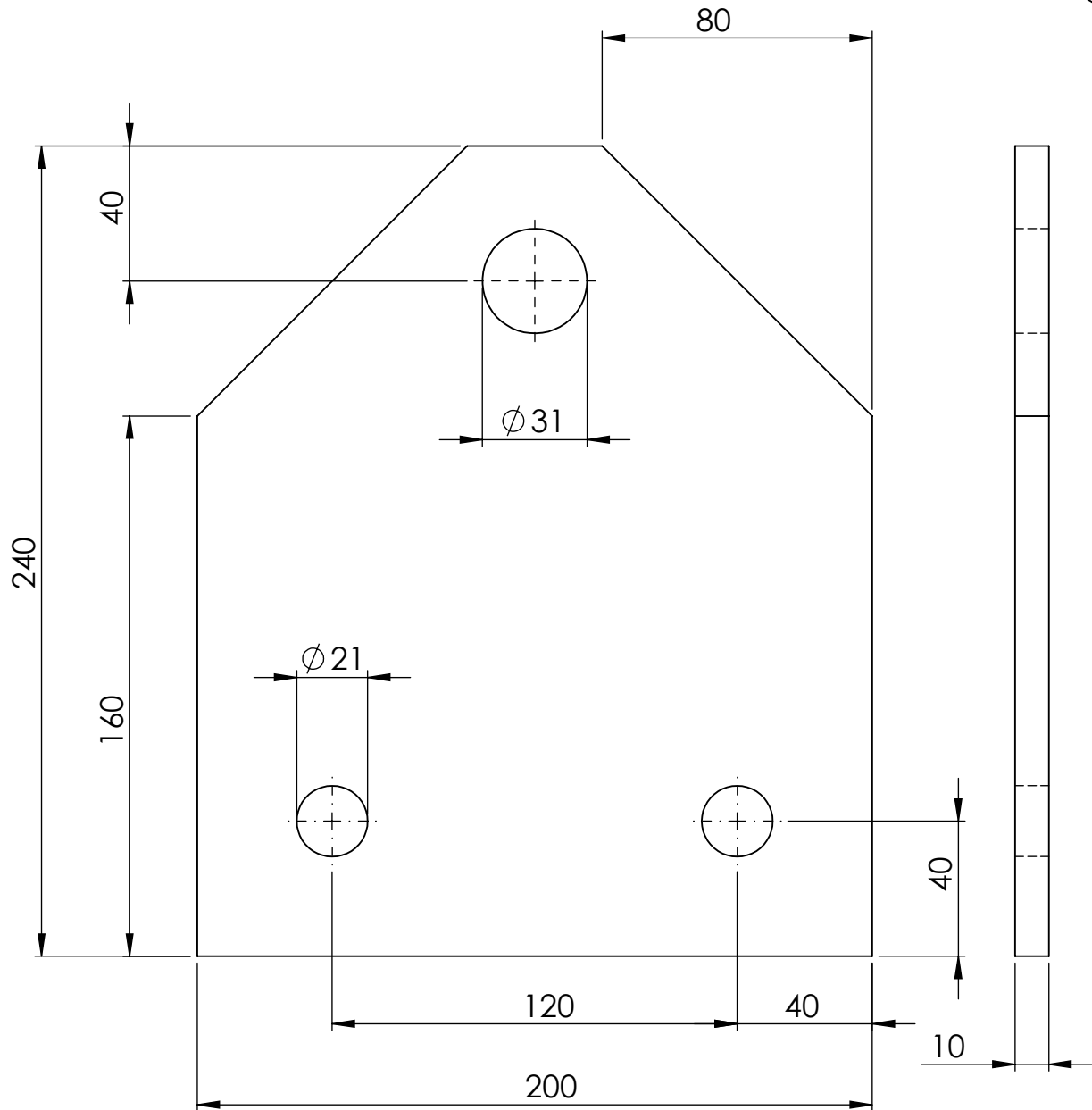
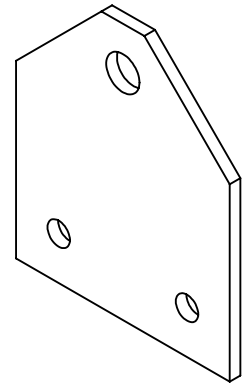
Quantidade a fabricar:  
2 Unidades

|   |            |                |                   |          |
|---|------------|----------------|-------------------|----------|
| Autor:  | Data:      | Material:      | Título:           |          |
| Hugo Gouveia  | 07/06/2015 | S355 J2 H      | Suporte [80x80x8] |          |
|  |            | Tolenciamento: | Des. N.º          | pt       |
|   |            |                | Escala: 1:2       | Revisão: |




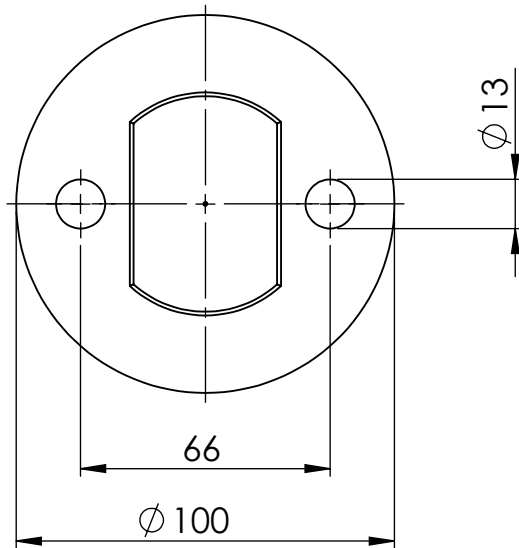
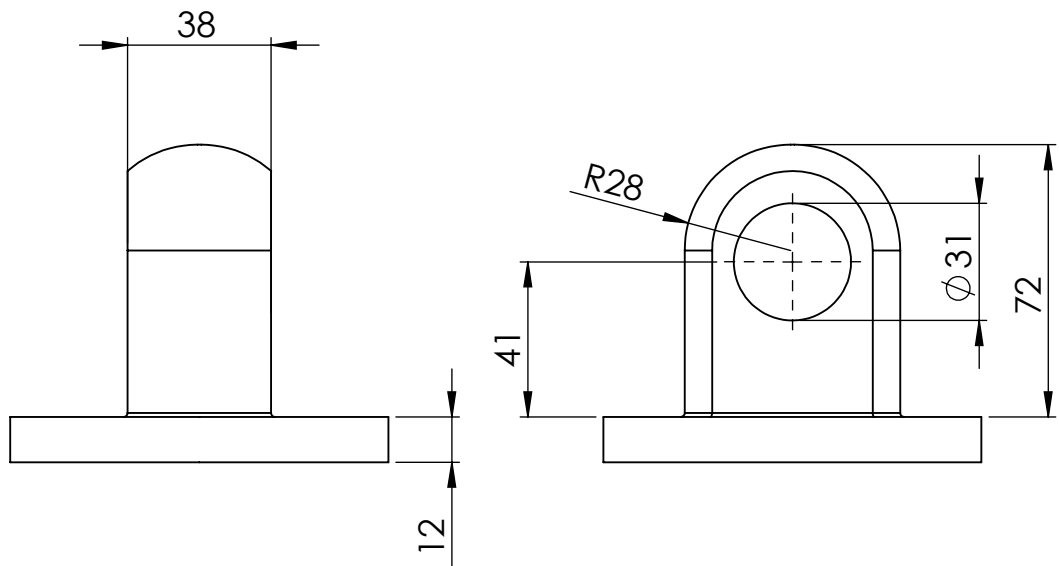
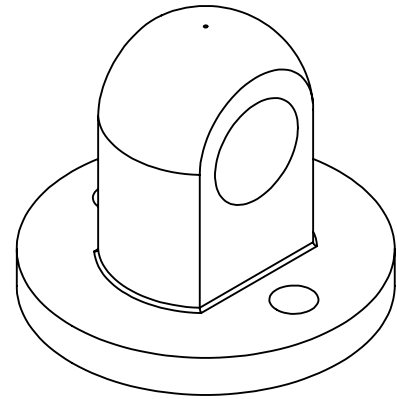
Quantidade a fabricar:  
2 Unidades

|   |  |            |          |                |              |                         |    |
|---|--|------------|----------|----------------|--------------|-------------------------|----|
| Autor:  |  | Data:      |          | Material:      |              | Titulo:                 |    |
| Hugo Gouveia  |  | 07/06/2015 |          | Ck 45          |              | Ligação Célula de Carga |    |
|  Instituto Superior de Engenharia do Porto |  |            |          | Tolenciamento: |              | Des. N.º                |    |
|   |  |            |          | ISO 2768 - mK  |              |                         |    |
| Escala: 1:1   |  |            | Revisão: |                | Folha 1 de 1 |                         | pt |
|   |  |            |          |                |              |                         | A4 |




Quantidade a fabricar:  
2 Unidades

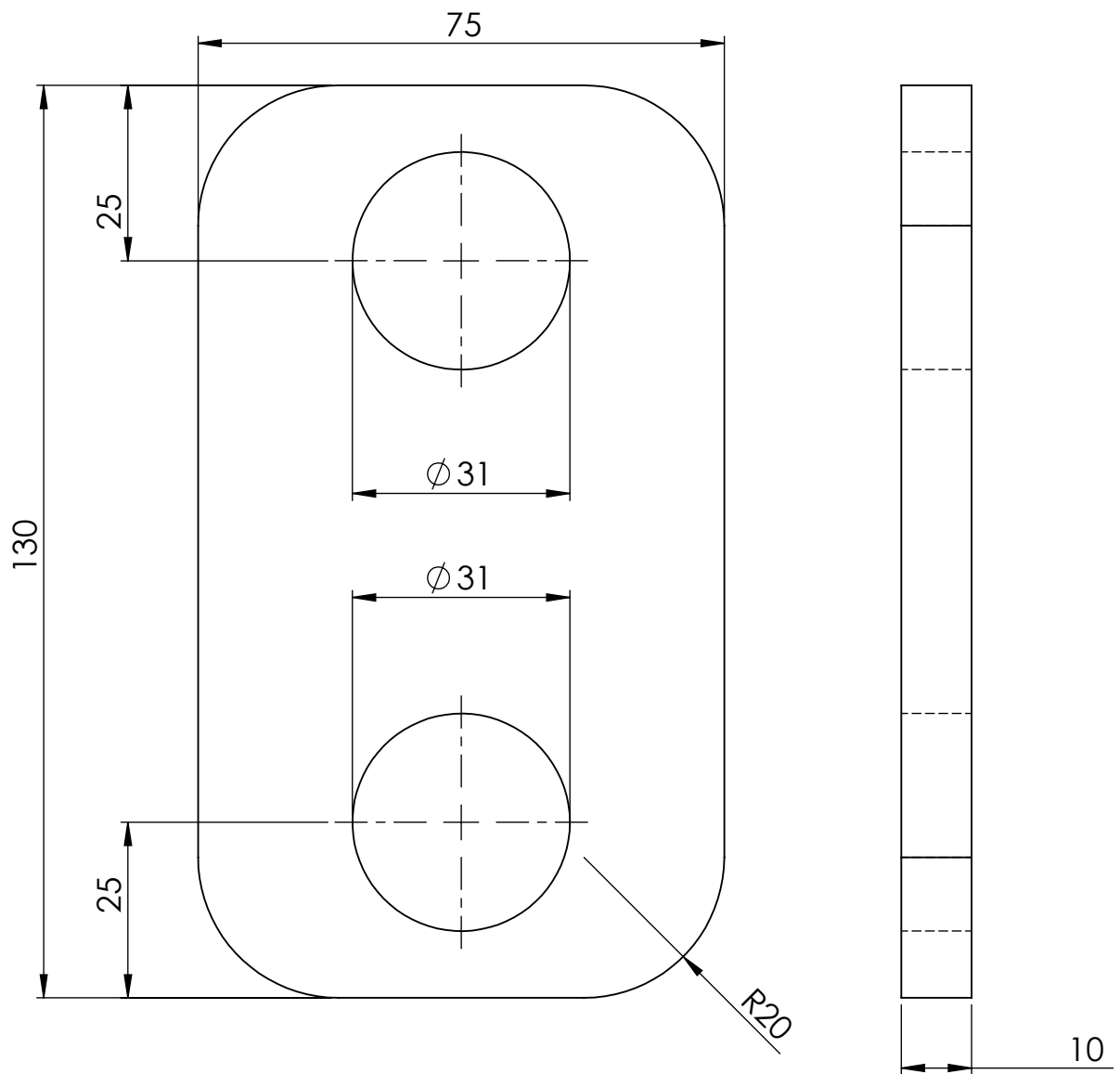
|   |            |                |                           |          |
|---|------------|----------------|---------------------------|----------|
| Autor:  | Data:      | Material:      | Título:                   |          |
| Hugo Gouveia  | 07/06/2015 | S355 J2 H      | Fixação - Célula de Carga |          |
|  Instituto Superior de Engenharia do Porto |            | Tolenciamento: | Des. N.º                  | pt       |
|   |            |                | Escala: 1:2               | Revisão: |
|   |            |                | A4                        |          |




Quantidade a fabricar:  
1 Unidade

|   |            |                |                         |              |
|---|------------|----------------|-------------------------|--------------|
| Autor:  | Data:      | Material:      | Título:                 |              |
| Hugo Gouveia  | 09/06/2015 | Ck 45          | Acessório Base Cilindro |              |
|  |            | Tolenciamento: | Des. N.º                | pt           |
|   |            | ISO 2768 - mK  | Escala: 1:2             | A4           |
|   |            |                | Revisão:                | Folha 1 de 1 |

Chapa de Ligação:  
Célula de Carga - Cilindro

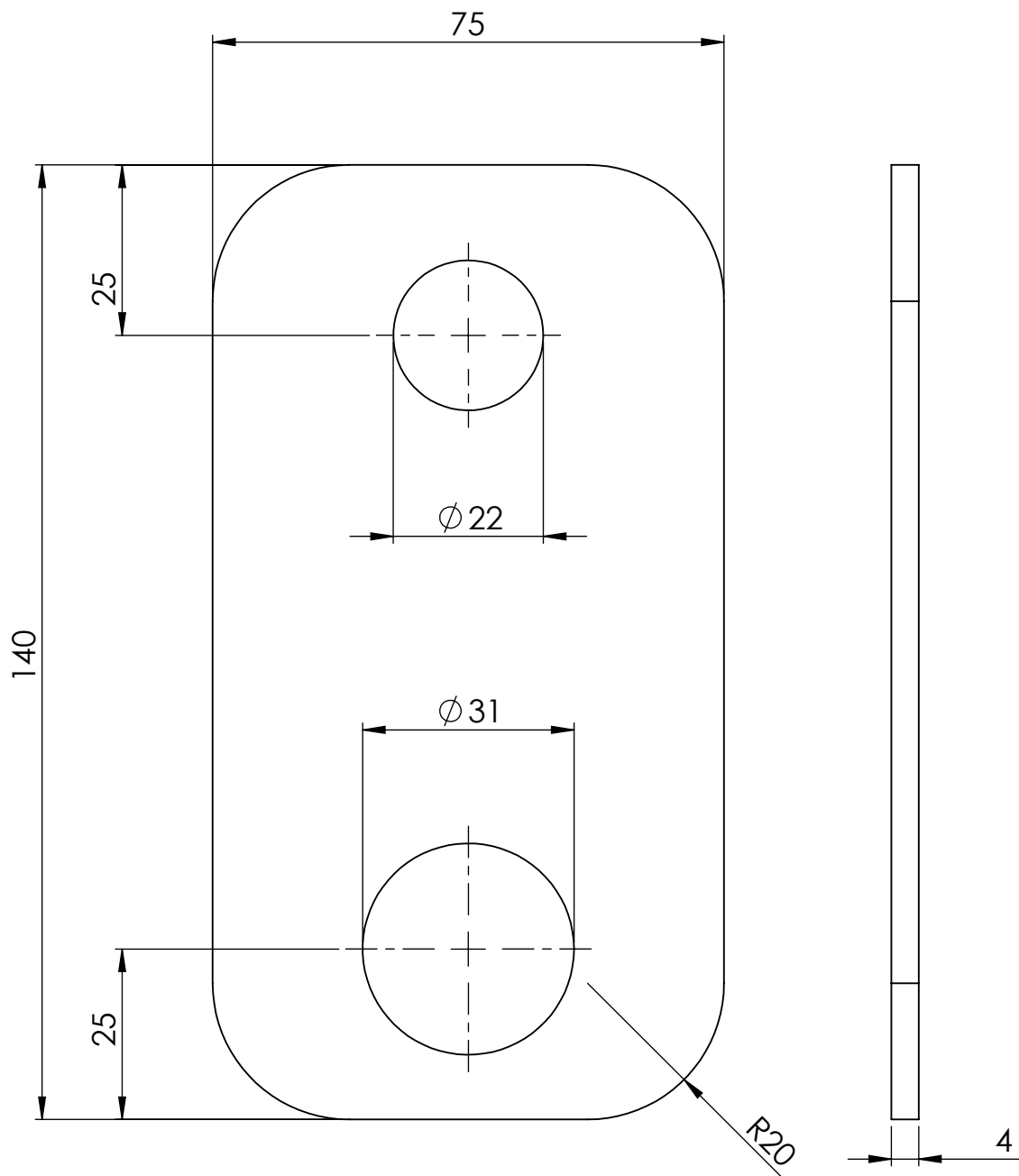


Quantidade a fabricar:  
2 Unidades


|   |            |                |                  |          |              |
|---|------------|----------------|------------------|----------|--------------|
| Autor:  | Data:      | Material:      | Título:          |          |              |
| Hugo Gouveia  | 07/06/2015 | Ck 45          | Chapa de Ligação |          |              |
|  Instituto Superior de Engenharia do Porto |            | Tolenciamento: | Des. N.º         |          | pt           |
|   |            |                | Escala: 1:1      | Revisão: | Folha 1 de 2 |

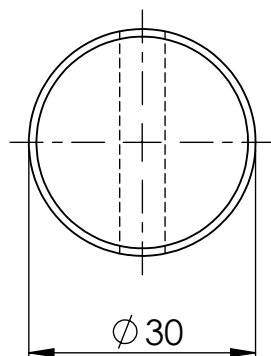
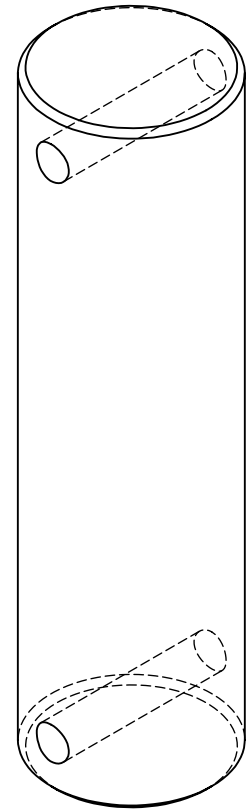
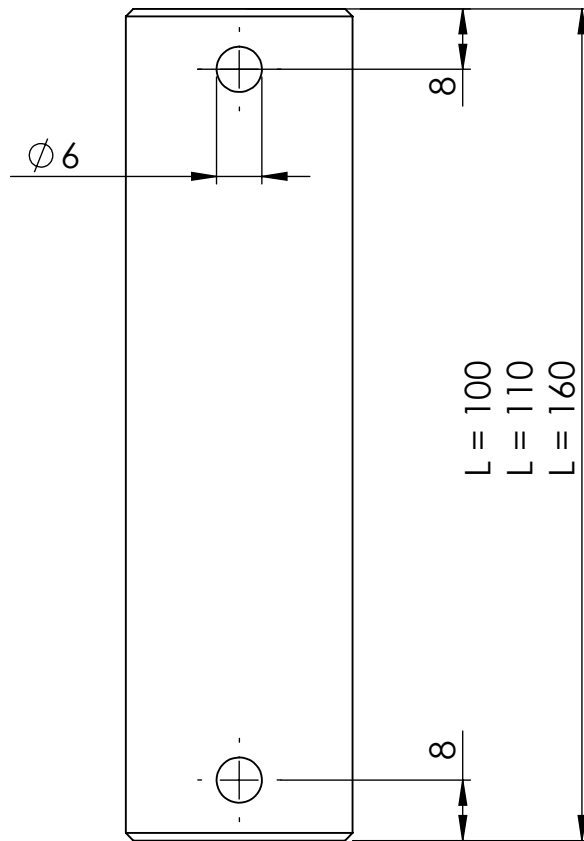
Chapa de Ligação:

Carro - Cilindro




Quantidade a fabricar:  
2 Unidades

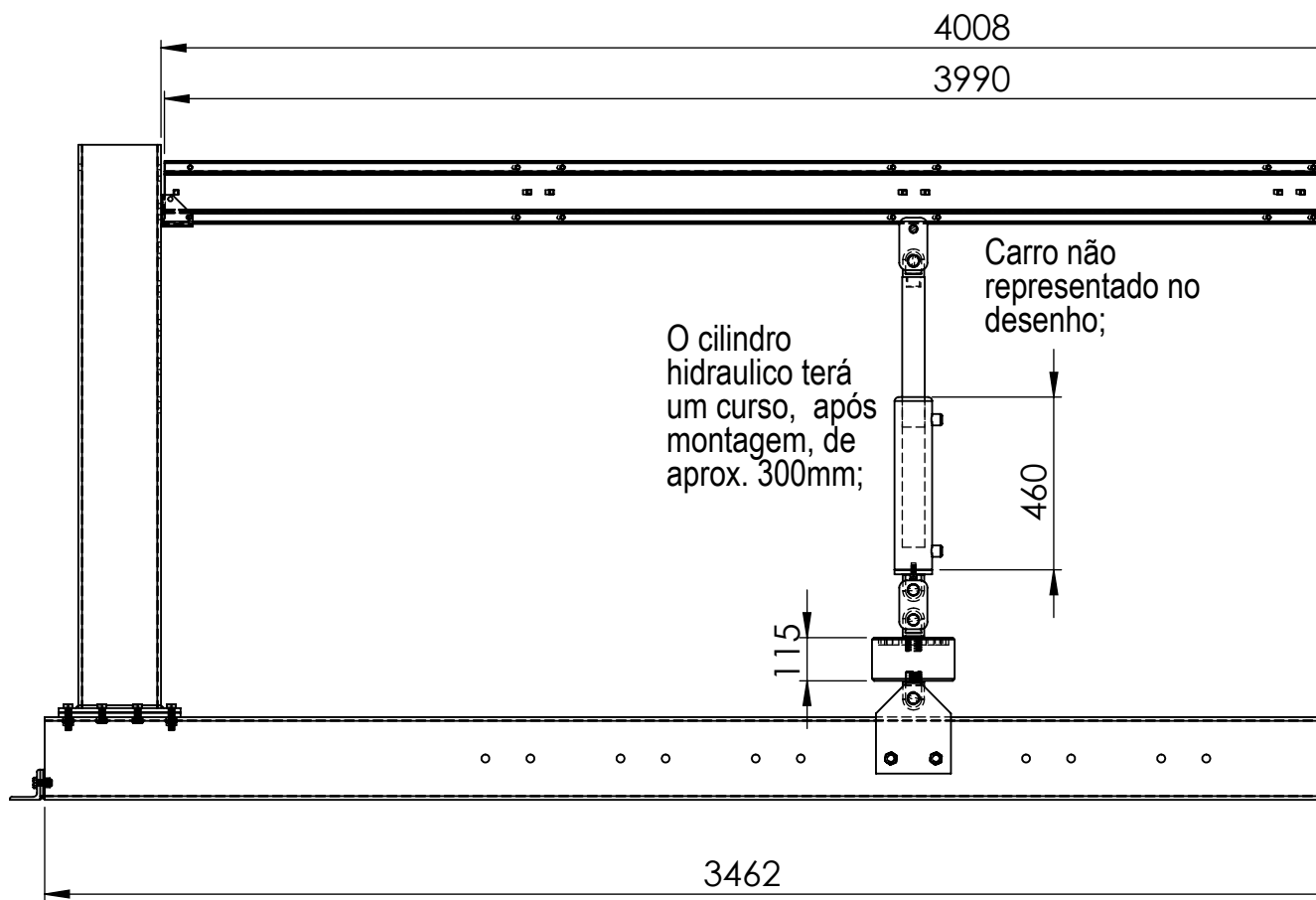
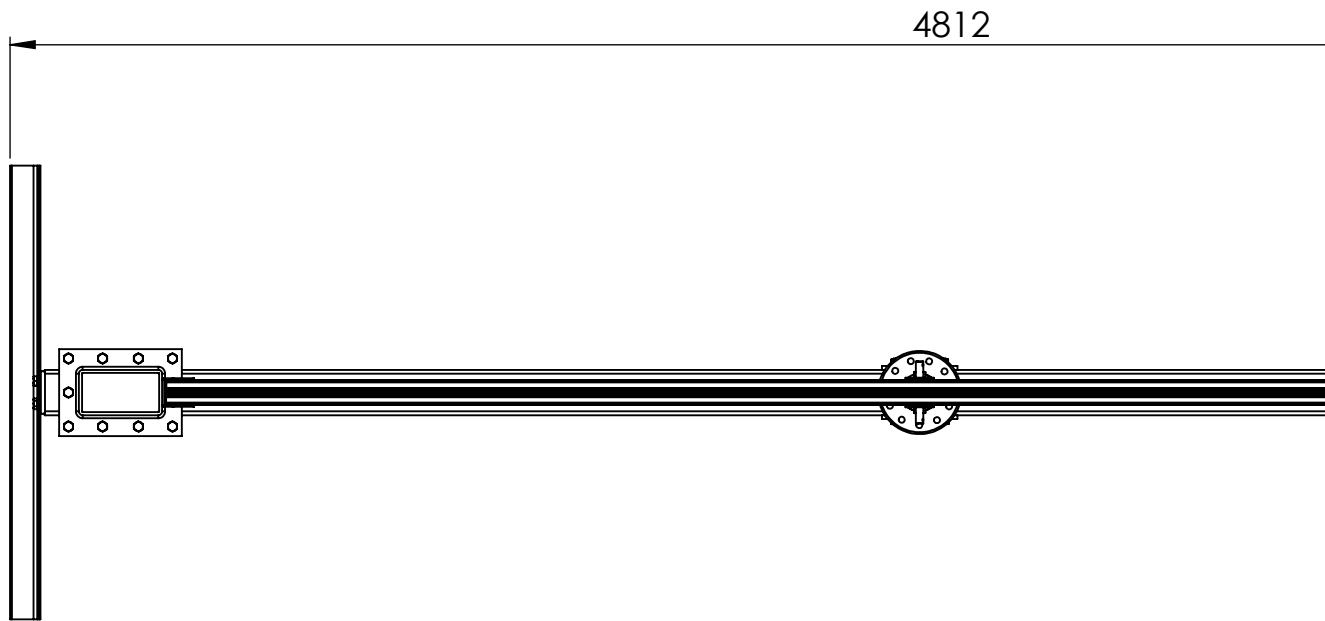
|   |            |                |                  |          |
|---|------------|----------------|------------------|----------|
| Autor:  | Data:      | Material:      | Título:          |          |
| Hugo Gouveia  | 07/06/2015 | Ck 45          | Chapa de Ligação |          |
|  |            | Tolenciamento: | Des. N.º         | pt       |
|   |            |                | Escala: 1:1      | Revisão: |

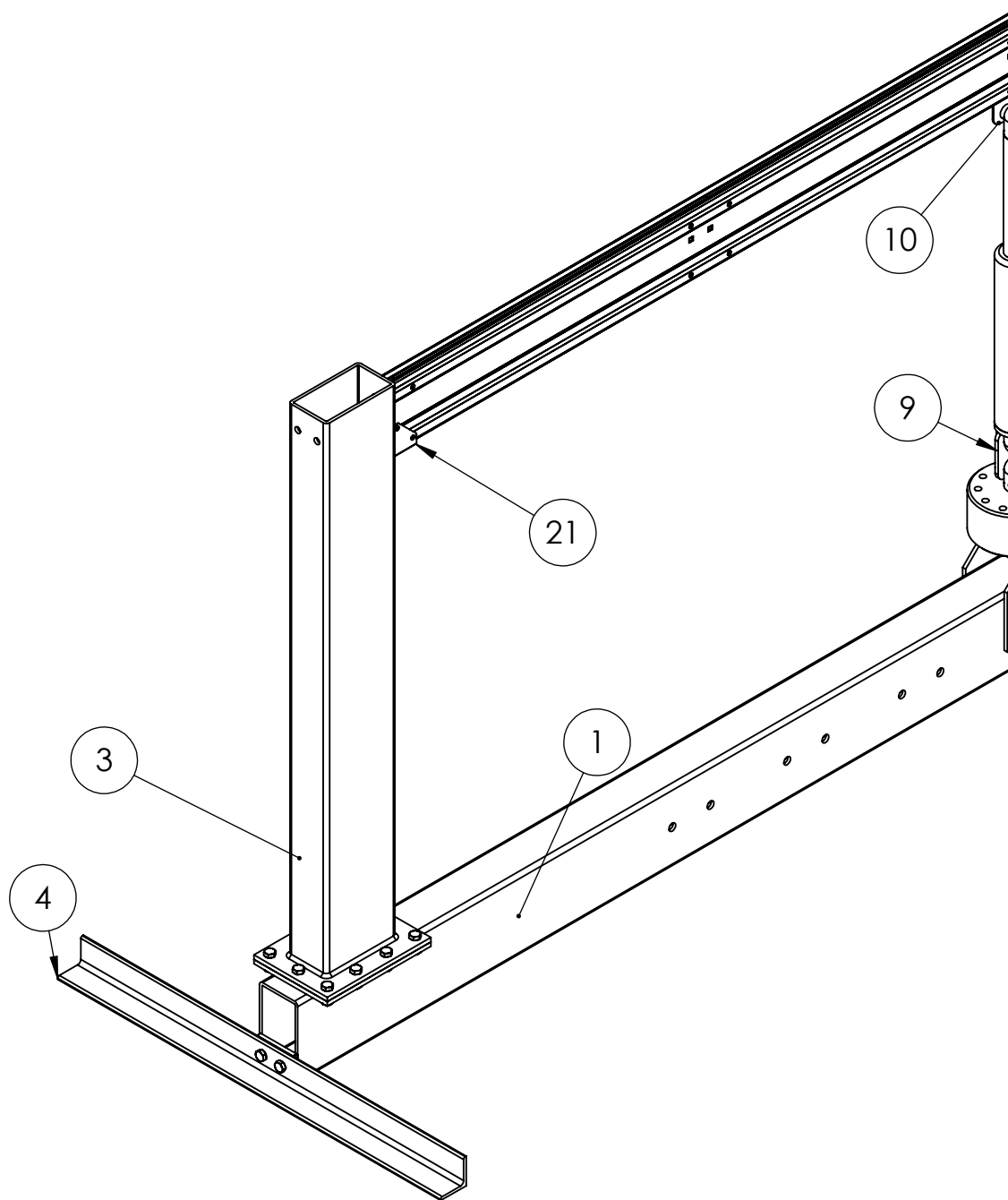


Quantidade a fabricar:


$L = 100$  mm (2 Unidades)  
 $L = 110$  mm (1 Unidades)  
 $L = 160$  mm (1 Unidade)

|   |            |                |                  |          |
|---|------------|----------------|------------------|----------|
| Autor:  | Data:      | Material:      | Titulo:          |          |
| Hugo Gouveia  | 07/06/2015 | Ck 45          | Veios de Ligação |          |
|  |            | Tolenciamento: | Des. N.º         | pt       |
|   |            | ISO 2768 mK    | Escala: 1:1      | Revisão: |





| N.º | Parte                                     | Quantidade |
|-----|---|------------|
| 1   | Viga [3460]                               | 1          |
| 2   | Viga [1166]                               | 1          |
| 3   | Pilar                                     | 2          |
| 4   | Suporte [Contoneira]                      | 2          |
| 5   | [Célula de Carga]                         | ---        |
| 6   | Ligação Roscada [Célula de Carga]         | 2          |
| 7   | Chapa de Ligação [Viga - Celula de Carga] | 2          |
| 8   | Macaco Hidraulico                         | ---        |
| 9   | Chapa de Ligação [Célula - Cilindro]      | 2          |
| 10  | Chapa de Ligação [Cilindro - Carro]       | 2          |
| 11  | Veio -170x30 [Célula - Viga]              | 1          |
| 12  | Veio -100x30 [Célula - Cilindro]          | 2          |
| 13  | Veio - 120x30 [Cilindro - Carro]          | 1          |
| --  | ISO 4016 - M20 x 160 x 52-WS              | 2          |
| --  | ISO 4017 - M16 x 50-S                     | 29         |
| --  | ISO 4017 - M16 x 70-S                     | 4          |
| --  | Hexagon Nut ISO - 4032 - M16 - W - S      | 33         |
| --  | Hexagon Nut ISO - 4032 - M20 - W - S      | 2          |
| 21  | Viga Composta/Acessórios                  | ---        |
| --  | Washer ISO 7089 - 20                      | 4          |
| 24  | Apoio                                     | 1          |

|   |       |                |                   |            |          |
|---|-------|----------------|-------------------|------------|----------|
| Autor:  | Data: | Material:      | Titulo:           |            |          |
| Hugo Gouveia  | ---   | ---            | Listagem Material |            |          |
|  |       | Tolenciamento: | Des. N.º          |            | pt       |
|   |       |                | ---               | Escala: -- | Revisão: |

