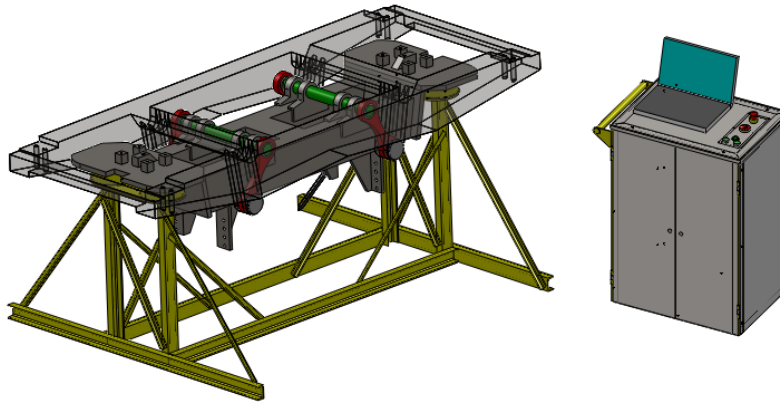




INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
Universidade Técnica de Lisboa



## **Projecto de um Banco de Ensaios do Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante**

**Gabriel Gomes Gameiro**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Mecânica**

### **Júri**

Presidente: Prof. Doutor Luís Manuel Varejão Oliveira Faria

Orientador: Prof. Doutor Luís Filipe Galvão dos Reis

Co-Orientador: Prof. Francisco José Lamy Figueiras

Vogal: Eng. Manuel Correia Alves da Cruz

**Outubro de 2011**



## Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço aos meus orientadores, os Professores Luís Filipe Galvão dos Reis e Francisco José Lamy Figueiras pelo apoio, orientação deste trabalho e numerosas sugestões que levaram à elaboração desta dissertação. Estou-lhes sinceramente agradecido pelo conhecimento, experiência e inspiração que me transmitiram nestes últimos anos, como professores de várias disciplinas.

Um agradecimento também ao Professor José Raul Carreira Azinheira pela ajuda e orientação no dimensionamento e selecção dos componentes do circuito electrónico.

Também agradeço aos Engenheiros Rui Alves Pereira e Carlos Manuel Gaspar Touret pelo apoio, ajuda e receptividade na empresa EMEF, S.A. e ao Eng. Miguel Ryder pela ajuda no dimensionamento e selecção dos componentes do circuito hidráulico e pela amabilidade de me ter recebido na empresa CUDELL<sup>®</sup> – Engenharia & Serviços.

Agradeço igualmente a oportunidade e o interesse demonstrado pela CP – Comboios de Portugal, E.P.E pelo presente estudo.

Saúdo todos os meus colegas e amigos do Instituto Superior Técnico.

Este trabalho é dedicado à minha namorada Andreia, à qual agradeço toda a sua ajuda e apoio incondicional.

Um agradecimento muito especial aos meus pais, à minha irmã e aos meus sogros, aos quais agradeço toda a ajuda, apoio e incentivo ao longo de todo o meu percurso escolar.

## **Resumo**

Esta tese apresenta o projecto de um banco de ensaios para o Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante do comboio de pendulação activa CP 4000 da empresa CP - Comboios de Portugal, E.P.E..

Este banco de ensaios servirá para observar/medir o ângulo de inclinação da travessa de carga em relação à travessa dançante e os ângulos das posições relativas das bielhas de ligação Travessa de Carga/Travessa Dançante.

Os principais objectivos deste projecto são: 1) Fazer o projecto do banco de ensaios com base em normas/códigos de projecto; 2) Implementar procedimentos/metodologia para a observação/medição dos ângulos das posições relativas das travessas e das bielhas; 3) Analisar os custos de fabrico.

Este trabalho tem como ponto de partida a necessidade de adquirir um banco de ensaios que substitua o actual método manual e moroso que a empresa EMEF, S.A. usa através de uma máquina laser de medição de coordenadas.

O banco de ensaios é composto por uma estrutura de suporte do conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante e por uma consola que suporta um grupo de potência hidráulico para accionar os cilindros hidráulicos de pendulação para inclinar a Travessa de Carga em relação à Travessa Dançante e um circuito electrónico, com uma cadeia de actuação e uma cadeia de medida, para que se monitorize todo o ensaio através de um computador, actuando no circuito hidráulico e medindo os ângulos pretendidos.

Na estrutura de suporte realizou-se uma verificação das forças envolvidas e fez-se uma análise estrutural através de um método analítico com base no Eurocódigo 3 e de um método numérico (Método dos Elementos Finitos). No circuito hidráulico e no circuito electrónico, foram dimensionados e seleccionados todos os componentes que os constituem.

Em conclusão, apresenta-se um banco de ensaios e uma nova metodologia de medição dos ângulos que satisfaz os requisitos e constrangimentos especificados neste projecto.

### **Palavras-Chave:**

Banco de Ensaio, Comboio, Pendulação Activa, Projecto Estrutural, Eurocódigo 3, Óleo-Hidráulica

## **Abstract**

This thesis shows the design of a test bench for the tilting bolster over the bogie of the tilting train CP 4000 of the company *CP- Comboios de Portugal, E.P.E.*

This test will serve to measure the angle of inclination between load bolster and tilting bolster and the angles of the relative positions between the connecting rods of the tilting bolster over the bogie.

The main objectives of this design are: 1) Design the test bench based on standards/Codes of the Mechanical Engineering Design; 2) Develop new procedures/methodology for observation/measurement the angles of the relative positions of the two plates and the connecting rods; 3) Analysis of manufacturing costs of the test bench.

This project was inspired by the need of the EMEF, S.A. Company to obtain one test bench which is able to replace manual stay work methods. i.e. measurements by a coordinate laser machine.

This test bench is composed by a support structure of the tilting bolster over the bogie and by a work station that includes a hydraulics power unit to operate the hydraulic cylinders of tilting, to tilt the charge plate, and an electronic control unit, to allow that one computer controls hydraulic circuit and measure the angles.

In the supporting structure, the forces involved were checked and was caused out a structural analysis of the structure by means of an analytical method based on Eurocode 3 and a numerical method (finite element method). Concerning the hydraulic circuit and electronic unit, all the components were scaled and selected.

As final result, it's presented a test bench and a new methodology for measuring the angles that satisfy the requirements and constraints specified in this project.

### **Keywords:**

Test Bench, Train, Active Tilting, Structural Design, Eurocode 3, Oil-Hydraulic

# Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo .....	ii
Palavras-Chave .....	ii
Abstract.....	iii
Keywords .....	iii
Lista de Figuras .....	vii
Lista de Tabelas .....	ix
Lista de Siglas .....	x
Lista de Símbolos .....	x
Letras gregas .....	x
Outros símbolos.....	x
Circuito Hidráulico:.....	xii
Lista de Programas .....	xii
1.    Memória Descritiva e Justificativa.....	1
1.1. Motivação .....	1
1.2. Descrição do Ensaio Realizado Actualmente .....	2
1.3. Especificações do Projecto do Banco de Ensaios do Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante .....	3
1.3.1. Requisitos do Projecto .....	3
1.3.2. Constrangimentos do Projecto.....	5
1.4. Normas/ Códigos/ Regulamentos .....	5
1.4.1. Eurocódigo 3 – Projecto de Estruturas de Aço .....	6
Parte 1-1: Regras Gerais e Regras para Edifícios .....	6
1.4.1.1. Objectivo e campo de aplicação.....	6
1.4.1.2. Material – Aço estrutural.....	6
1.4.1.3. Cálculo de tensões nas secções transversais .....	6
1.4.2. Eurocódigo 3 – Projecto de Estruturas de Aço.....	7
Parte 1-8: Projecto de Ligações.....	7
1.4.2.1. Ligações com parafusos.....	7
1.4.2.1.1. Generalidades .....	7
1.4.2.1.2. Cálculo da resistência individual dos parafusos .....	7
1.4.2.2. Ligações soldadas .....	9
1.4.2.2.1. Generalidades .....	9
1.4.2.2.2. Cálculo da resistência de um cordão de ângulo .....	11
1.5. Metodologia Utilizada .....	12
1.5.1. Projecto da estrutura de suporte do conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante .....	12
1.5.2. Projecto da consola móvel.....	13

1.6. Solução Encontrada .....	14
1.6.1. Descrição da estrutura de suporte do conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante .....	14
1.6.2. Consola móvel .....	16
1.6.2.1. Carro móvel .....	16
1.6.2.2. Circuito hidráulico .....	18
1.6.2.3. Circuito Electrónico .....	20
1.6.2.3.1. Cadeia de Actuação .....	20
1.6.2.3.2. Cadeia de Medida .....	21
1.6.2.3.3. Descrição do Programa.....	22
1.7. Montagem e fabrico da estrutura de suporte .....	23
1.8. Estimativa de Custos .....	26
2. Notas de Cálculo .....	31
2.1. Introdução.....	31
2.2. Estrutura de Suporte do Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante .....	31
2.2.1. Geração de Conceito .....	31
2.2.2. Método Utilizado na Análise Estrutural .....	33
2.2.3. Propriedades do Material .....	33
2.2.4. Cálculo Estrutural pelo Eurocódigo 3.....	34
2.2.4.1. Simplificação e Carregamentos.....	34
2.2.4.2. Perfis Utilizados .....	35
2.2.4.3. Resistência dos Elementos .....	36
2.2.4.4. Ligações Soldadas .....	44
2.2.4.5. Ligações com Parafusos .....	53
2.2.5. Análise estrutural pelo Método dos Elementos Finitos.....	55
2.2.5.1. Método de Elementos Finitos .....	55
2.2.5.2. Modelo de Elementos de Viga Timoshenko .....	55
2.2.5.3. Condições de Fronteira e Carregamentos Utilizados.....	57
2.2.5.4. Campo de Tensões .....	58
2.2.5.5. Campo de Deslocamentos .....	59
2.2.5.6. Evitar a Queda Lateral.....	61
2.3. Consola móvel.....	61
2.3.1. Circuito Hidráulico .....	61
2.3.2. Circuito Electrónico .....	64
3. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	70
4. Referências .....	71
5. Anexos .....	72
Anexo A – Catálogo de Perfis UPN (Grupo Ferpinta).....	72
Anexo B – Catálogo de Cantoneiras (Grupo Ferpinta) .....	73
Anexo C – Catálogo de Perfis Ocos Circulares (Grupo Ferpinta) .....	74

Anexo D – APDL .....	75
Análise de Tensões e Deslocamentos.....	75
Verificação da estrutura inclinada a 45° .....	79
Anexo E – Desenhos Técnicos da Estrutura de Suporte.....	84



## Lista de Figuras

Figura 1.1: Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante no suporte existente .....	1
Figura 1.2: Estrutura de suporte existente actualmente na EMEF .....	2
Figura 1.3: Ferramentas especiais usadas nos ensaios realizados até ao momento: .....	3
Figura 1.4: Comprimentos dos cordões em soldadura descontínua .....	10
Figura 1.5: Espessura dos cordões de ângulo .....	10
Figura 1.6: Componentes das tensões num cordão de soldadura .....	11
Figura 1.7: Estrutura de suporte final do Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante .....	14
Figura 1.8: Estrutura com o conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante .....	15
Figura 1.9: Detalhe dos deslocamentos angulares das bielas e da travessa de carga.....	15
Figura 1.10: Pormenor do assentamento da Travessa Dançante nos apoios da estrutura .....	16
Figura 1.11: Conceito do carro móvel .....	16
Figura 1.12: Mesa móvel a adquirir do fabricante FACOM® .....	17
Figura 1.13: Esquema do circuito hidráulico .....	19
Figura 1.14: Cadeia de Actuação .....	21
Figura 1.15: Cadeia de Medida dos inclinómetros das travessas .....	21
Figura 1.16: Cadeia de Medida dos inclinómetros das bielas.....	21
Figura 1.17: Condicionamento de Sinal .....	22
Figura 1.18: Montagem do Cavalete .....	24
Figura 1.19: Posicionamento relativo dos dois cavaletes .....	24
Figura 1.20: Montagem das vigas longitudinais da base .....	24
Figura 1.21: Montagem das vigas transversais da base.....	25
Figura 1.22: Montagem dos elementos de cantoneiras .....	25
Figura 1.23: Montagem Final .....	26
Figura 2.1: Primeiro conceito da estrutura de suporte .....	31
Figura 2.2: Detalhe das molas da suspensão secundária .....	32
Figura 2.3: Conceito final da estrutura de suporte .....	32
Figura 2.4: Diagrama de Corpo Livre da estrutura.....	34
Figura 2.5: Perfis utilizados nos elementos da estrutura .....	35
Figura 2.6: DCL do elemento "c" .....	36
Figura 2.7: DCL do elemento "b".....	37
Figura 2.8: Diagrama de esforços do elemento "b".....	37
Figura 2.9: DCL do elemento "d".....	39
Figura 2.10: Diagrama de esforços do elemento "d" .....	39
Figura 2.11: Posicionamento do centro de massa.....	41
Figura 2.12: Estrutura inclinada a 45° .....	41
Figura 2.13: DCL do elemento "a".....	42
Figura 2.14: Esquema de forças no elemento "f".....	43
Figura 2.15: Esquema de esforços no apoio.....	43

Figura 2.16: Perfil cantoneira com centróide.....	45
Figura 2.17: Detalhe da ligação do componente "c" com "b".....	45
Figura 2.18: Detalhe da ligação do componente "e" com "d".....	46
Figura 2.19: Detalhe da ligação do componente "f" com "a".....	46
Figura 2.20: Detalhe da ligação do componente "e" com "b".....	47
Figura 2.21: Detalhe do cordão 3.....	48
Figura 2.22: Detalhe da ligação do componente "f" com "b".....	48
Figura 2.23: Detalhe do cordão 3.....	49
Figura 2.24: Detalhe da ligação do componente "b" aos componentes "a" e "d".....	50
Figura 2.25: Detalhe da ligação do componente "a" com "d" (caso 1).....	50
Figura 2.26: Detalhe da ligação do componente "a" com "d" (caso 2).....	51
Figura 2.27: Detalhe da ligação das chapas de fixar os apoios aos componente " b".....	51
Figura 2.28: Tensões na ligação.....	52
Figura 2.29: Soldadura descontínua no apoio.....	52
Figura 2.30: Esquema da furação da ligação por parafusos.....	53
Figura 2.31: Perfil "UPN 80" gerado pelo ANSYS.....	56
Figura 2.32: Perfil "L 30x30x4" gerado pelo ANSYS.....	56
Figura 2.33: Perfil da placa dos apoios gerado pelo ANSYS.....	57
Figura 2.34: Estrutura em elementos finitos com forças e constrangimentos aplicados.....	58
Figura 2.35: Distribuição de tensões com a força 0.3P transversal.....	58
Figura 2.36: Distribuição de tensões com a força 0.3P longitudinal.....	59
Figura 2.37: Campo de deslocamentos com a força 0.3P Transversal.....	60
Figura 2.38: Campo de deslocamentos com a força 0.3P longitudinal.....	60
Figura 2.39: Distribuição de tensões com a estrutura inclinada 45°.....	61
Figura 2.40: Circuito hidráulico.....	62
Figura 2.41: Forças actuantes na travessa de carga.....	63
Figura 2.42: Gráfico n vs u.....	65
Figura 2.43: Gráficos i vs ângulo.....	66
Figura 2.44: Cadeia de medida dos inclinómetros das travessas.....	66
Figura 2.45: Cadeia de medida dos inclinómetros das bielas.....	66
Figura 2.46: Circuito conversor Corrente-Tensão.....	67
Figura 2.47: Gráfico u vs u'.....	67
Figura 2.48: Circuito Subtractor.....	68
Figura 2.49: Condicionamento de Sinal final.....	68

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Normas, Classes e Propriedades de Aços .....	6
Tabela 1.2: Classe e resistência dos parafusos .....	7
Tabela 1.3: Valores de $k_s$ .....	9
Tabela 1.4: Coeficientes de atrito.....	9
Tabela 1.5: Factor de correlação $\beta_w$ .....	12
Tabela 1.6: Legenda da figura 1.7. ....	14
Tabela 1.7: Identificação dos componentes do circuito hidráulico.....	18
Tabela 1.8: Estimativa de custos do fabrico da estrutura de suporte .....	27
Tabela 1.9: Custo de aquisição do carro móvel .....	27
Tabela 1.10: Estimativa de custos do fabrico do circuito hidráulico .....	28
Tabela 1.11: Estimativa de custos do fabrico do circuito hidráulico .....	29
Tabela 1.12: Estimativa de custos do fabrico do banco de ensaios .....	29
Tabela 2.1: Legenda da figura 2.3. ....	33
Tabela 2.2: Propriedades do aço a utilizar (S235 - EN10025-2) .....	33
Tabela 2.3: Peso do Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante.....	35
Tabela 2.4: Propriedades das secções dos perfis UPN 80 e Cantoneira .....	35
Tabela 2.5: Propriedades da secção do tubo D244.5.....	36
Tabela 2.6: Peso total da estrutura com o conjunto de travessas .....	41

## Lista de Siglas

EMEF	–	Empresa de Manutenção de Equipamento Ferroviário
CP	–	Comboios de Portugal
NP	–	Norma Portuguesa
EN	–	“ <i>European Norm</i> ” (Norma Europeia)
DAQ	–	Data Acquisition (Aquisição de Dados)
DCL	–	Diagrama de Corpo Livre
MEF	–	Método dos Elementos Finitos

## Lista de Símbolos

### Letras gregas

$\nu$	–	Coefficiente de <i>Poisson</i>
$\sigma$	–	Tensão normal
$\tau$	–	Tensão de corte

### Outros símbolos

$A_W$	–	Área efectiva do cordão de soldadura.
$A_b$	–	Área bruta da secção transversal do parafuso
$A_s$	–	Área resistente do parafuso na parte roscada
$A_u$	–	Área da secção útil que intercepta os furos dos parafusos
$F_{R,esc}$	–	Força resistente ao escorregamento por parafuso
$F_{R,esm}$	–	Força resistente ao esmagamento por parafuso
$F_{V,b}$	–	Força de corte por parafuso
$F_V$	–	Força de corte na ligação com parafusos
$F_{p,c}$	–	Força de pré-esforço
$L_1$	–	Afastamento entre as extremidades dos cordões de soldadura
$L_W$	–	Comprimento do cordão de soldadura
$N_R$	–	Força resistente plástica da secção útil que intercepta os furos dos parafusos
$P_{cr}$	–	Força crítica de instabilidade
$d_0$	–	Diâmetro do furo passante para um parafuso
$e_1$	–	Distância entre o centro de um furo de um parafuso e a extremidade adjacente medida na direcção da transmissão do esforço
$e_2$	–	Distância entre o centro de um furo de um parafuso e o bordo adjacente medida na direcção perpendicular à transmissão do esforço
$n_i$	–	Coefficiente de segurança de instabilidade

$p_1$	–	Distância entre os eixos dos parafusos de uma fiada medida na direcção da transmissão do esforço
$p_2$	–	Distância medida perpendicularmente à direcção de transmissão do esforço entre fiadas adjacentes de parafusos
$\gamma_{M0}$	–	Coefficiente parcial de segurança
$\gamma_{M2}$	–	Coefficiente parcial de segurança de resistência dos elementos e das secções transversais
$\gamma_{M3}$	–	Coefficiente parcial de segurança de resistência ao escorregamento no estado limite último
$\sigma_{\parallel}$	–	Tensão normal paralela ao eixo do cordão de soldadura
$\sigma_{\perp}$	–	Tensão normal perpendicular à espessura do cordão de soldadura
$\sigma_M$	–	Tensão originada pelo momento flector
$\sigma_N$	–	Tensão originada pelo esforço axial
$\sigma_{VM}$	–	Tensão equivalente de Von Mises
$\sigma_{adm}$	–	Tensão admissível
$\sigma_u$	–	Tensão de ruptura
$\sigma_{ub}$	–	Tensão de ruptura à tracção dos parafusos
$\sigma_y$	–	Tensão de cedência
$\sigma_{yb}$	–	Tensão de cedência à tracção dos parafusos
$\tau_{\parallel}$	–	Tensão de corte (no plano da espessura) paralela ao eixo do cordão de soldadura
$\tau_{\perp}$	–	Tensão de corte (no plano da espessura) perpendicular ao eixo do cordão de soldadura
$\tau_V$	–	Tensão de corte provocada por esforço transversal
$E$	–	Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young
$M$	–	Momento flector
$N$	–	Esforço axial
$V$	–	Esforço transversal
$a$	–	Espessura de um cordão de soldadura
$d$	–	Diâmetro nominal do parafuso
$i$	–	Corrente
$n$	–	Coefficiente de segurança
$t$	–	Espessura do componente
$u$	–	Tensão

## **Circuito Hidráulico:**

$V_u$	–	Cilindrada da bomba hidráulica
$\eta_v$	–	Rendimento volumétrico da bomba
$A$	–	Área do êmbolo do cilindro Hidráulico
$P$	–	Potência
$Q$	–	Caudal
$S$	–	Curso do êmbolo do cilindro hidráulico
$V$	–	Volume
$n$	–	Frequência angular
$p$	–	Pressão
$t$	–	Tempo

## **Lista de Programas**

ANSYS 11<sup>®</sup>

Solidworks 2010<sup>®</sup>

LabVIEW 2010<sup>®</sup>

# 1. Memória Descritiva e Justificativa

## 1.1. Motivação

Nesta memória descritiva apresenta-se o trabalho a desenvolver, a metodologia seguida, analisa-se a exequibilidade e conclui-se com uma estimativa de custos de fabrico.

O banco de ensaio do Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante vem reforçar o equipamento necessário à Empresa de manutenção de Equipamento Ferroviário (EMEF) para garantir a qualidade dos serviços prestados na manutenção de comboios, uma vez que EMEF possui um Sistema de Gestão da Qualidade certificado desde o ano 2000, actualmente conforme a norma NP EN ISO 9001:2008, cobrindo todo o seu domínio de actividade em todas as suas oficinas. Neste caso, este equipamento serve para ensaiar o Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante do comboio de pendulação activa CP 4000, propriedade da empresa CP - Comboios de Portugal, E.P.E.

Actualmente a realização deste ensaio procede-se de um modo não programado, não havendo um procedimento técnico a seguir, podendo demorar algumas horas a realizar. É utilizado um suporte construído pela empresa para suportar o Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante, um monta-cargas para inclinar a travessa de carga 8° em relação à travessa dançante, dispositivos de fixação para tentarem garantir os 8° de inclinação e uma máquina de leitura de coordenadas “Leica Laser Tracker – LTD709” com um *software* associado, a partir do qual são determinadas as posições relativas das quatro bielhas.



Figura 1.1: Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante no suporte existente

O objectivo deste trabalho é o projecto de um banco de ensaios em que utilizando os cilindros hidráulicos do próprio Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante, actuados por um circuito óleo-hidráulico, seja simulado o movimento de pendulação do comboio e verificadas as posições relativas das quatro bielhas, sendo tudo controlado através de um computador que comanda o circuito óleo-hidráulico e lê constantemente o ângulo entre a travessa de carga e a

travessa dançante. Atingido o valor esperado, neste caso concreto de 8°, o computador deve verificar o deslocamento angular das quatro bielas e comparar com o deslocamento angular teórico dado pelo fabricante.

## 1.2. Descrição do Ensaio Realizado Actualmente

Para medirem os ângulos relativos das quatro bielas e o deslocamento angular de 8° entre a travessa de carga e a travessa dançante é utilizada uma máquina laser de medição de coordenadas já existente na empresa. A utilização desta máquina requer que o objecto onde se fazem as medições se mantenha fixo, uma vez que esta mede todas as distâncias em relação á sua posição fixa. Posteriormente são calculadas as dimensões pretendidas.

Com o requisito de ter que manter o objecto a medir fixo, foi construída na empresa uma estrutura para suportar o Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante, ilustrado na figura 1.2.

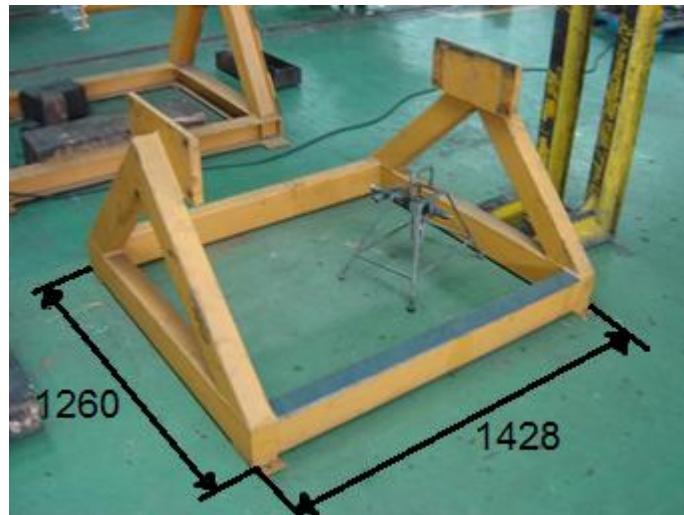


Figura 1.2: Estrutura de suporte existente actualmente na EMEF

Com esta estrutura é aproveitada a furação de fixar as placas dos batentes transversais da suspensão secundária para fixar o conjunto à estrutura através de 8 parafusos.

A presente estrutura apresenta alguns inconvenientes:

- O procedimento de colocar o conjunto na estrutura e fixá-lo através dos parafusos é um método demorado e requer um procedimento cuidado;
- Necessita de dois operadores, para que com um dispositivo de levantamento de cargas, se coloque o conjunto no suporte e se alinhe os furos para serem colocados os parafusos;
- O modo como a operação é realizada não assegura a estabilidade do sistema podendo haver queda lateral.



Inicialmente, para inclinarem a travessa de carga  $8^\circ$  em relação á travessa dançante utilizavam uma ponte rolante e mediam várias vezes o ângulo entre as respectivas travessas até perfazer  $8^\circ$ . Como este método era muito demorado fizeram-se ferramentas especiais para que através do uso de um monta-cargas se consiga inclinar e posicionar a travessa de carga nos  $8^\circ$  de uma forma mais rápida.



a)



b)

Figura 1.3: Ferramentas especiais usadas nos ensaios realizados até ao momento:

- a) Ferramenta para manter as travessas paralelas
- b) Ferramenta para garantir o deslocamento angular de  $8^\circ$  da travessa de carga em relação à travessa dançante

### 1.3. Especificações do Projecto do Banco de Ensaio do Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante

Em seguida apresentam-se os requisitos e os constrangimentos do projecto.

#### 1.3.1. Requisitos do Projecto

- I. **O Banco de ensaios tem de ter a capacidade de inclinar a travessa de carga  $8^\circ$  em relação à travessa dançante.**
- II. **O Banco de ensaios deverá ser projectado tendo em atenção as normas e códigos em vigor.**

Sendo o suporte do Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante uma estrutura metálica, esta vai ser projectada de acordo com o Eurocódigo 3 (NP EN 1993): Projecto de estruturas de aço.

A consola que contém o grupo de potência hidráulico deverá cumprir os requisitos impostos pela Directiva Máquinas que regula todos os tipos de máquinas da união europeia.

**III. Uso de perfis e componentes normalizados.**

Todos os perfis de aço que compõem a estrutura de suporte deverão ser normalizados e de fácil aquisição. Componentes como parafusos, porcas, anilhas e olhais também deverão ser normalizados bem como os outros componentes necessários ao projecto.

**IV. O banco de ensaios deverá ter o menor peso possível.**

Tendo em conta que o peso é um elemento preponderante no projecto, tanto a estrutura como a consola deverão ser o mais leves possível, visto que o peso e o custo estão directamente relacionados.

**V. O banco de ensaios deverá ser transportável.**

Como não há um local fixo definido para colocar o banco de ensaios nem para a realização dos ensaios, tanto a estrutura como a consola deverão ser fáceis de transportar a fim de facilitar o seu manuseamento.

**VI. O ensaio deverá ser feito de forma automática e num intervalo de 10 minutos.**

Com o objectivo de poupar tempo, pretende-se que apenas pressionando um botão, a consola tenha a capacidade de efectuar o ensaio automaticamente num intervalo de 5 minutos.

**VII. A consola deverá ter também dispositivos de comando manual.**

A consola deverá ter dispositivos de comando manual para que o operador possa realizar o ensaio manualmente, caso seja necessário.

**VIII. A Consola deverá ter um dispositivo de paragem de emergência.**

A consola deverá ter um dispositivo de paragem instantânea para que em qualquer situação de emergência a segurança dos operadores esteja garantida.

**IX. Os dispositivos deverão estar marcados com clareza e terem uma boa visibilidade.**

Todos os dispositivos de emergência e de comando têm de estar visíveis e sinalizados com clareza para que o seu uso seja intuitivo.

**X. Emissão automática dos relatórios de ensaio.**

Após a realização de cada ensaio, o software de controlo deve emitir um relatório com os resultados obtidos nos ensaios.

### 1.3.2. Constrangimentos do Projecto

**I. A medição dos ângulos deverá ser precisa.**

Por forma a garantir a qualidade dos resultados obtidos do ensaio, a cadeia de medida tem de garantir a maior precisão possível na leitura dos ângulos.

**II. A estrutura de suporte deve ter uma resistência mecânica adequada para suportar o Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante e manter sempre uma boa estabilidade.**

Por forma a garantir a segurança dos operadores, a estrutura de suporte tem de ser estável e evitar a queda lateral em situações de emergência: sismos, acidentes com máquinas de transporte de armazém, etc.

**III. A estrutura deverá ser rígida por forma a que o deslocamento máximo seja menor que  $L/300$ .**

A estrutura deverá ser suficientemente rígida de modo a evitar pequenas oscilações que possam ocorrer durante o ensaio e perturbar as medições dos ângulos.

**IV. A espessura mínima dos componentes deverá ser de 4mm.**

Constrangimento imposto pelo Eurocódigo 3 e aceite como adequado para a construção em causa.

### 1.4. Normas/ Códigos/ Regulamentos

Como um dos objectivos desta dissertação é fazer o dimensionamento do banco de ensaio com base em normas/códigos de projecto, para projectar o suporte do Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante tem-se por base a NP EN 1993 - Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço, uma vez se trata de uma estrutura metálica de aço estrutural.

Apesar de este código ser para o projecto de estruturas metálicas, ele está direccionado para o projecto de edifícios e de outras obras de engenharia civil em aço. Sendo a estrutura objecto desta tese, uma estrutura muito simples, apenas para suportar um conjunto de componentes que pesa cerca de 1500 Kg, houve a necessidade de fazer algumas aproximações na aplicação do mesmo. Assim sendo, retirou-se deste código toda a informação relativa aos perfis estruturais de aço a utilizar, ao material e ao projecto de ligações: soldadas e aparafusadas.

De seguida é mostrada toda a informação retirada do Eurocódigo 3 necessária à execução do projecto.

## 1.4.1. Eurocódigo 3 – Projecto de Estruturas de Aço

### Parte 1-1: Regras Gerais e Regras para Edifícios

#### 1.4.1.1. Objectivo e campo de aplicação

O presente código estabelece os princípios de base para o projecto de estruturas de aço com componentes de espessura  $t \geq 4$  mm.

#### 1.4.1.2. Material – Aço estrutural

Segundo este código as propriedades do aço estrutural a utilizar nos cálculos são as seguintes:

- Módulo de Elasticidade  $E = 210\,000$  MPa
- Coeficiente de Poisson em regime elástico  $\nu = 0.3$

Os valores nominais da tensão de cedência,  $\sigma_y$ , e da tensão de ruptura,  $\sigma_u$ , para aços estruturais laminados a quente, deverão ser obtidos consultando a tabela 1.1, resumida.

Norma e classe do aço	Espessura nominal $t$ do componente da secção [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_u$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_u$ [MPa]
<b>EN 10025-2</b>				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	490	335	470
S 450	450	550	410	550
<b>EN 10025-3</b>				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540

Tabela 1.1: Normas, Classes e Propriedades de Aços

#### 1.4.1.3. Cálculo de tensões nas secções transversais

Para o cálculo da tensão equivalente numa secção transversal de um componente, o Eurocódigo 3 afirma que pode ser utilizada a tensão equivalente de von Mises, dada pela equação (1):

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (1)$$

Em que  $\sigma$  é o somatório de todas as tensões normais que actuam na secção e  $\tau$  é o somatório de todas as tensões de corte que actuam na secção.

## 1.4.2. Eurocódigo 3 – Projecto de Estruturas de Aço

### Parte 1-8: Projecto de Ligações

A estrutura metálica de suporte do conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante tem os seus componentes ligados entre si por soldadura e tem os quatro apoios ligados à estrutura através de ligações com parafusos. Assim, nas secções 1.4.2.1 e 1.4.2.2, mostra-se a metodologia retirada da NP EN 1993-1-8 para o cálculo de ligações soldadas e com parafusos.

#### 1.4.2.1. Ligações com parafusos

##### 1.4.2.1.1. Generalidades

Na presente Norma, os valores da tensão de cedência,  $\sigma_{yb}$ , e da tensão de ruptura,  $\sigma_{ub}$ , à tracção dos parafusos a utilizar no cálculo do projecto de ligações com parafusos estão indicados na tabela 1.2.

Classe do parafuso	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
$\sigma_{yb}$ [MPa]	240	320	300	400	480	640	900
$\sigma_{ub}$ [MPa]	400	400	500	500	600	800	1000

Tabela 1.2: Classe e resistência dos parafusos

##### 1.4.2.1.2. Cálculo da resistência individual dos parafusos

As ligações com parafusos estão divididas em categorias conforme os esforços a que estes estão sujeitos. Assim, como a ligação dos apoios à estrutura apenas está sujeita ao corte (no estado limite último), segundo a NP EN 1993-1-8 [pág. 26], as ligações dos apoios à estrutura são da categoria C: *Ligação resistente ao escorregamento no estado limite último*. Para esta categoria de ligação é recomendado o uso de parafusos pré-esforçados das classes 8.8 ou 10.9.

No dimensionamento destas ligações deve verificar-se que o valor de cálculo do esforço de corte do estado limite último,  $F_{V,b}$ , não deverá exceder o valor de cálculo da resistência ao escorregamento,  $F_{R,esc}$ , nem o valor de cálculo da resistência ao esmagamento,  $F_{R,esm}$ . Também se deve verificar que no estado limite último não é excedido o valor de cálculo da resistência plástica da secção útil que intercepta os furos dos parafusos,  $N_R$ .

Devem pois verificar-se as seguintes condições:

$$F_{V,b} \leq F_{R,esm} \quad (2)$$

$$F_{V,b} \leq F_{R,esc} \quad (3)$$

$$F_V \leq N_R \quad (4)$$

De seguida são apresentadas as fórmulas para o cálculo da resistência individual de peças de ligação solicitadas ao corte:

• **Resistência ao esmagamento:**

$$F_{R,esm} = \frac{k_1 a_b \sigma_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (5)$$

-  $a_b$  é o menor dos valores  $a_d$ ,  $\frac{\sigma_{ub}}{\sigma_u}$  e 1.0

- na direcção de transmissão dos esforços:

- para parafusos de extremidade:  $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$

- para parafusos interiores:  $\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$

- perpendicularmente à direcção de transmissão dos esforços:

- para parafusos de extremidade:  $k_1$  é o menor dos valores

$$2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7 \quad ; \quad 1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7 \quad \text{e} \quad 2.5$$

- para parafusos interiores:  $k_1$  é o menor dos valores  $1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7$  e 2.5

-  $\gamma_{M2} = 1.25$

• **Resistência ao escorregamento:**

$$F_{R,esc} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,c} \quad (6)$$

$$F_{p,c} = 0.7 \sigma_{ub} A_s \quad (7)$$

Em que:

$e_1$  – distância entre o centro do furo e a extremidade adjacente medida na direcção do esforço

$e_2$  – distância entre o centro do furo e o bordo adjacente medida na direcção perpendicular à do esforço.

$p_1$  – distância entre dois furos de uma fiada medida na direcção do esforço

$p_2$  – distância entre duas fiadas adjacentes medida na direcção perpendicular à do esforço

$d_0$  – diâmetro do furo passante de um parafuso

$A_s$  – área resistente de um parafuso na parte roscada

$k_s$  – parâmetro cujos valores são obtidos na tabela 1.3.

$n$  – número de planos de atrito

$\mu$  – coeficiente de atrito cujos valores são obtidos na tabela 1.4.

$\gamma_{M3} = 1.25$

Na tabela 1.3 são apresentados os valores de  $k_s$  e na tabela 1.4 são apresentados os coeficientes de atrito  $\mu$ .

Descrição	$k_s$
Parafusos em furos normalizados	1.0
Parafusos em furos sobredimensionados ou em furos ovalizados curtos com o eixo maior perpendicular à direcção de transmissão de esforços	0.85
Parafusos em furos ovalizados longos com o eixo maior perpendicular à direcção de transmissão de esforços	0.7
Parafusos em furos ovalizados curtos com o eixo maior paralelo à direcção de transmissão de esforços	0.76
Parafusos em furos ovalizados longos com o eixo maior paralelo à direcção de transmissão de esforços	0.63

Tabela 1.3: Valores de  $k_s$

Classe das superfícies de atrito (Ver EN 1090-2: <i>Requirements for the execution of steel structures</i> )	Coefficiente de atrito $\mu$
A	0.5
B	0.4
C	0.3
D	0.2

Tabela 1.4: Coeficientes de atrito

- **Resistência da secção útil que intercepta os furos dos parafusos:**

$$N_R = \frac{A_u \sigma_y}{\gamma_{M0}} \quad (8)$$

-  $\gamma_{M0} = 1.0$

-  $A_u$  – área da secção útil que intercepta os furos dos parafusos

## 1.4.2.2. Ligações soldadas

### 1.4.2.2.1. Generalidades

Toda a metodologia indicada na NP EN 1993-1-8 sobre ligações soldadas aplica-se a aços de construção soldáveis que respeitem a Norma EN 1993-1-1 e que tenham espessuras de material iguais ou superiores a 4 mm.

O valor da tensão de cedência do material de adição da soldadura deverá ser equivalente ou superior ao valor do material base.

A presente Norma abrange o dimensionamento de soldaduras de ângulo, de soldaduras de ângulo em contorno de orifícios, de soldaduras de topo, de soldaduras de bujão, e de soldaduras em bordos arredondados.

Poderão utilizar-se soldaduras de ângulo para a ligação de peças quando as superfícies de fusão formam entre si um ângulo compreendido entre 60° e 120°. Também são permitidos ângulos inferiores a 60°, no entanto deve-se considerar uma soldadura de topo com penetração parcial. Para

ângulos superiores a  $120^\circ$ , a resistência da soldadura deverá ser determinada através de ensaios de acordo com a EN 1990, Anexo D: Dimensionamento com apoio experimental.

Em ambiente corrosivo não deverão ser utilizadas soldaduras de ângulo descontínuas.

Numa soldadura de ângulo descontínua, os afastamentos entre as extremidades de cada cordão,  $L_1$ , e o comprimento de cada cordão,  $L_w$ , deverão satisfazer as condições da figura 1.4.

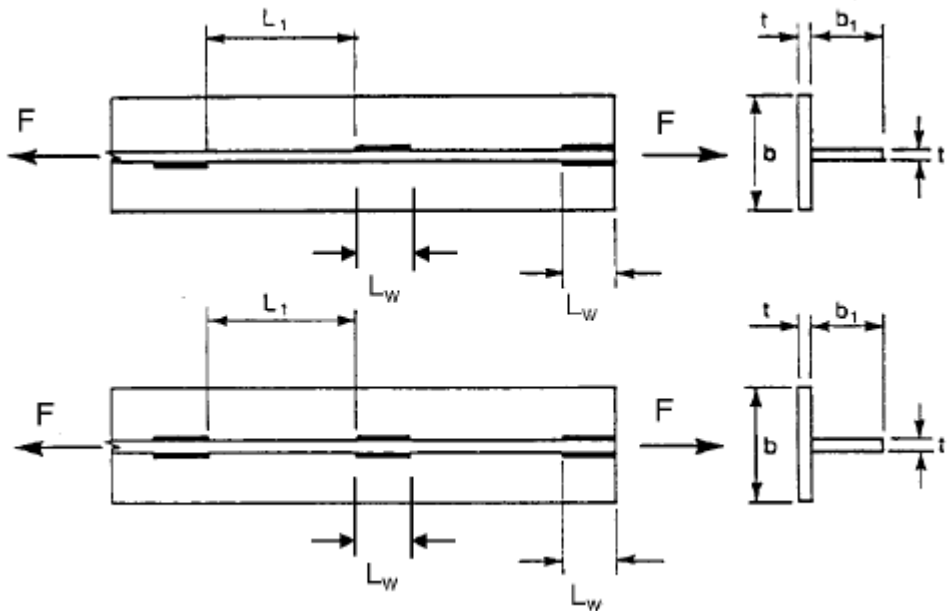


Figura 1.4: Comprimentos dos cordões em soldadura descontínua

Em que:

- $L_w \geq$  menor dos valores  $(0.75 b, 0.75 b_1)$
- $L_1 \leq$  menor dos valores  $(16 t, 16 t_1, 200 \text{ mm})$

Numa soldadura dimensionada para transmitir esforços, o comprimento do cordão deverá ser superior a 30 mm ou a 6 vezes a sua espessura, considerando-se o maior destes valores.

A espessura de um cordão de ângulo,  $a$ , deverá ser obtida conforme ilustrado na figura 1.5.

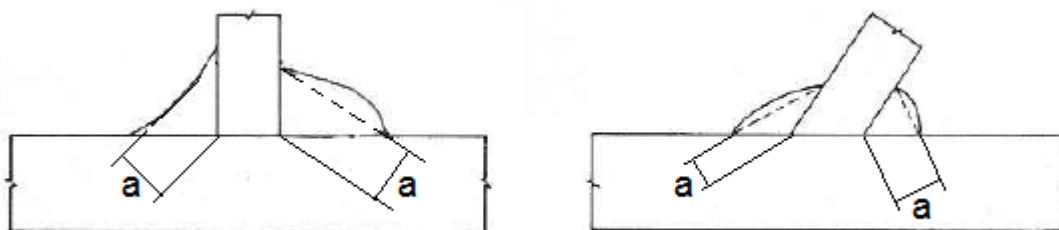


Figura 1.5: Espessura dos cordões de ângulo



### 1.4.2.2.2. Cálculo da resistência de um cordão de ângulo

Um dos dois métodos presentes nesta norma para calcular a resistência de um cordão de ângulo é o Método Direccional [NP EN 1993-1-8, pág. 47].

Neste método, os esforços transmitidos por unidade de comprimento do cordão são decompostos em componentes paralelas e perpendiculares ao plano que define a espessura do cordão conforme ilustrado na figura 1.6.

O valor de cálculo da área efectiva do cordão,  $A_w$ , deve ser considerado igual a  $A_w = \sum a L_w$ .

Para efeito do cálculo, admite-se que a área efectiva do cordão está concentrada na sua raiz e que as tensões estão distribuídas uniformemente pela espessura do cordão.

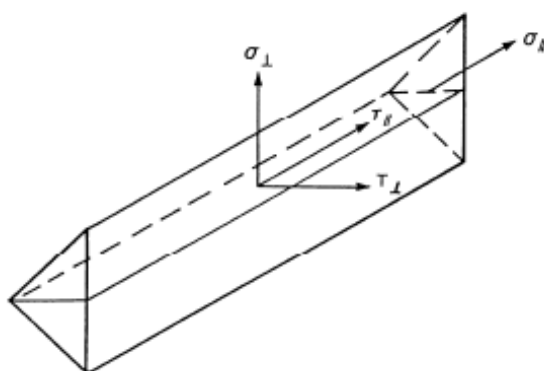


Figura 1.6: Componentes das tensões num cordão de soldadura

Neste método, o valor de cálculo da resistência do cordão de ângulo é suficiente se forem satisfeitas as duas condições seguintes:

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0.5} \leq \frac{\sigma_y}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (9)$$

$$\sigma_{\perp} \leq 0.9 \frac{\sigma_y}{\gamma_{M2}} \quad (10)$$

Em que:

$\sigma_y$  é o valor da tensão de cedência à tracção da peça ligada mais fraca;

$\beta_w$  é um factor de correlação apropriado obtido da tabela 1.5.

Na tabela 1.5 são apresentados os valores para o factor de correlação  $\beta_w$ .

Norma e classe do aço	Factor de correlação
EN 10025	$\beta_w$
S 235	0.8
S 235 W	
S 275	0.85
S 275 N/NL	
S 275 M/ML	
S 355	0.9
S 355 N/NL	
S 355 M ML	
S 355 W	
S 420 N/NL	1.0
S 420 M/ML	
S 460 N/NL	1.0
S 460 M/ML	
S 460 Q/QL/QL1	

Tabela 1.5: Factor de correlação  $\beta_w$

## 1.5. Metodologia Utilizada

Este projecto está dividido em 2 partes: Projecto da estrutura de suporte do conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante e projecto da consola móvel com o circuito hidráulico e com circuito electrónico.

### 1.5.1. Projecto da estrutura de suporte do conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante

O projecto da estrutura de suporte está dividido em 4 etapas:

#### 1. **Geração de conceito;**

Na primeira etapa, foram levantadas as vantagens e desvantagens da estrutura de suporte já existente na EMEF. Tendo-se concluído que a presente estrutura apresentava uma série de desvantagens, desenvolveu-se uma estrutura nova por forma a corrigir essas desvantagens.

#### 2. **Verificação estrutural;**

Depois de gerado o conceito da nova estrutura, procedeu-se à sua verificação estrutural; primeiro seguindo as indicações do Eurocódigo 3 e posteriormente pelo método numérico (Método dos Elementos Finitos) recorrendo ao *software* ANSYS®. Foi verificada a resistência de todos os elementos que constituem a estrutura bem como a resistência das ligações dos elementos. No final compararam-se os resultados para se verificar a fiabilidade dos mesmos.

#### 3. **Montagem e fabrico da estrutura**

Estando a estrutura projectada, elaborou-se um plano para a montagem e fabrico da estrutura.

#### 4. Estimativa de custos

A última etapa consistiu numa estimativa dos custos de fabrico da estrutura e dos restantes sistemas e componentes do sistema de actuação e medição.

### 1.5.2. Projecto da consola móvel

O projecto da consola móvel composta por uma mesa móvel que suporta um grupo de potência hidráulico e um circuito electrónico para medir os ângulos requeridos foi elaborado em 3 etapas:

#### 1. Geração do conceito da mesa móvel;

Para gerar o conceito da mesa móvel foram levantados todos os requisitos e constrangimentos de projecto impostos pela EMEF: a mesa móvel tinha de ter a capacidade de suportar um circuito hidráulico e um computador, tinha de ser fácil de transportar e tinha de possuir um conjunto de botões para actuação manual. Depois do conceito gerado, chegou-se à conclusão que era de todo vantajoso adquirir uma mesa móvel existente no mercado uma vez que é menos dispendioso que fabricar.

#### 2. Projecto do circuito hidráulico;

Uma das etapas mais importantes deste trabalho foi o projecto do circuito hidráulico. Foi estimado o valor da força requerida para inclinar a Travessa de carga em relação à Travessa Dançante para que juntamente com o tempo de inclinação fossem calculados os valores da pressão e caudal de óleo requeridos para se poder escolher uma bomba e um motor que garantissem a força exigida pelos cilindros. Foi consultado um fornecedor de componentes de hidráulica (Cudell – Engenharia & Serviços) para identificar todas as válvulas, filtros e outros componentes do circuito hidráulico por forma a fazer-se uma lista de compras e uma estimativa de custos relativos à montagem do circuito hidráulico.

#### 3. Circuito Electrónico;

Outra etapa importante foi o projecto do circuito electrónico do banco de ensaios, a cadeia de medida e a cadeia de actuação controladas por um computador através de um *software* gerado em *LabVIEW*. Foram consultados diversos catálogos de fornecedores de material electrónico (RS Components, Legrand e MRA – Instrumentação) para se identificarem os componentes a adquirir, nomeadamente os sensores adequados a utilizar para se medir os ângulos requeridos. Foram projectadas as cadeias de medida e actuação, foram identificados os principais componentes do circuito electrónico e foi elaborada uma estimativa de custos relativos ao fabrico do circuito.

## 1.6. Solução Encontrada

### 1.6.1. Descrição da estrutura de suporte do conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante

A solução encontrada para a estrutura de suporte do conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante está ilustrada na figura 1.7.

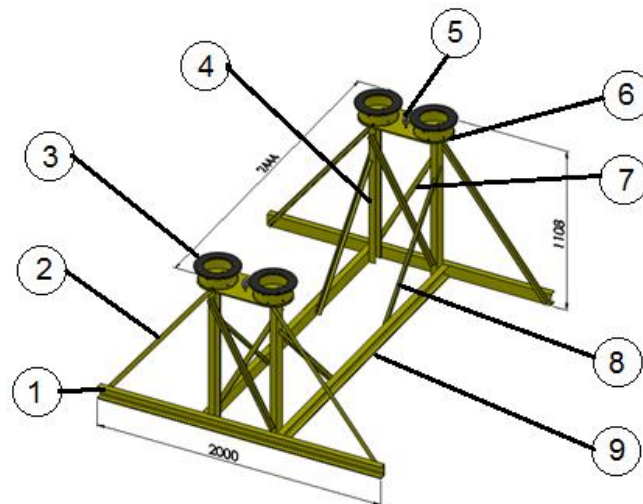


Figura 1.7: Estrutura de suporte final do Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante

Na tabela 1.6 está a legenda da figura 1.7.

Item	Descrição
1	Travessa transversal da base
2	Cantoneira de reforço para evitar a queda lateral
3	Apoio
4	Coluna
5	Olhal
6	Placa de fixar os apoios
7	Cantoneira de reforço da rigidez transversal
8	Cantoneira de reforço da rigidez longitudinal
9	Travessa longitudinal da base

Tabela 1.6: Legenda da figura 1.7.

Esta estrutura cumpre todos os requisitos e constrangimentos enumerados na secção 1.3 e tem como principais características:

- Peso: 178 Kg
- Largura máxima: 2000 mm
- Altura máxima: 1108 mm
- Comprimento máximo: 2444 mm
- Constituída essencialmente por elementos com perfis “UPN 80” e “L30x30x4”
- Possui 2 olhais para suspender e transportar a estrutura

Nas figuras 1.8, 1.9 e 1.10 pode ver-se a estrutura com o conjunto de conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante e o detalhe de encaixe do apoio da estrutura na base de assentamento das molas da suspensão secundária.

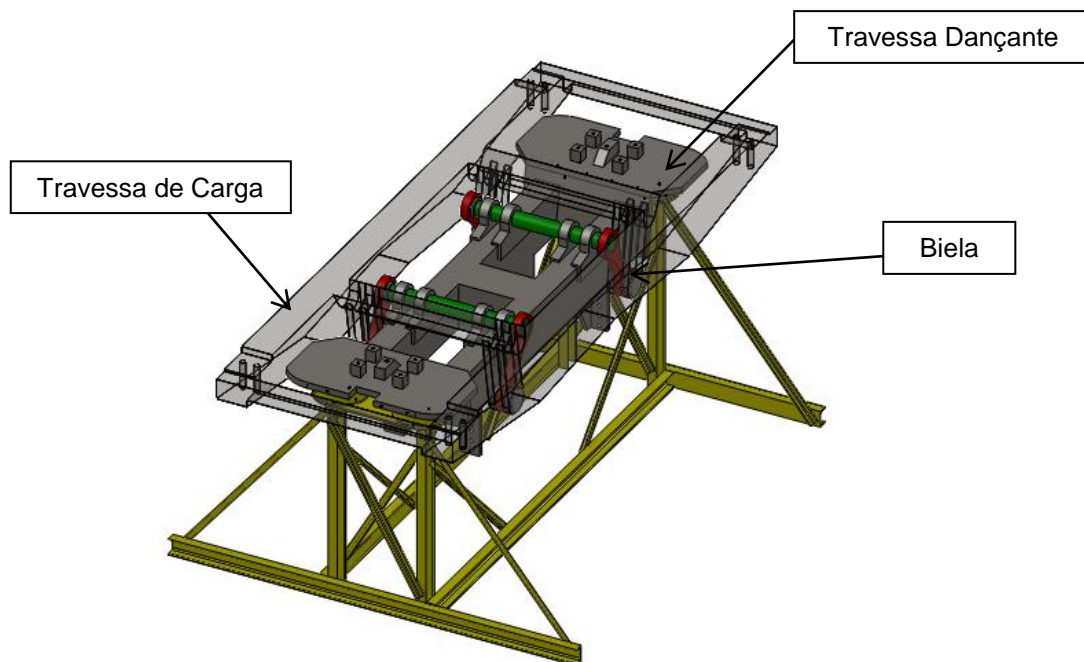


Figura 1.8: Estrutura com o conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante

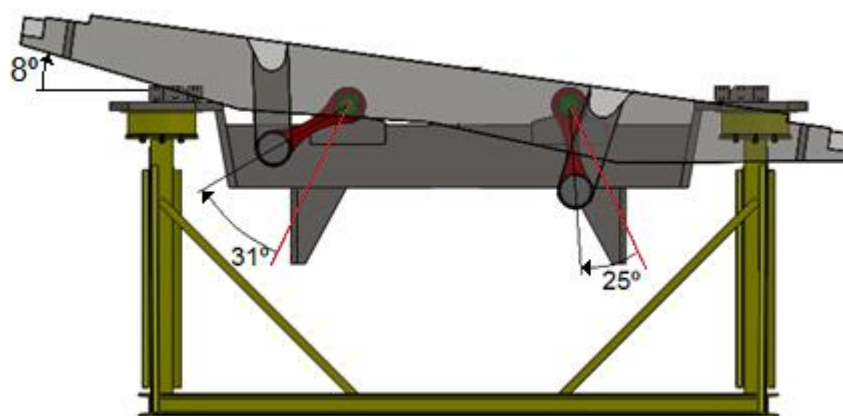


Figura 1.9: Detalhe dos deslocamentos angulares das bielas e da travessa de carga

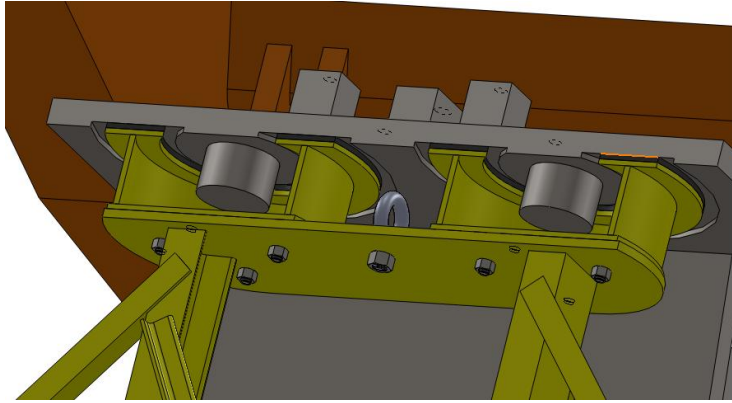


Figura 1.10: Pormenor do assentamento da Travessa Dançante nos apoios da estrutura

## 1.6.2. Consola móvel

Após a execução das etapas de projecto da consola móvel, obteve-se uma solução para a mesa móvel, uma solução para o circuito hidráulico e uma solução para o circuito electrónico.

### 1.6.2.1. Carro móvel

O conceito gerado para a mesa móvel está ilustrado na figura 1.11.

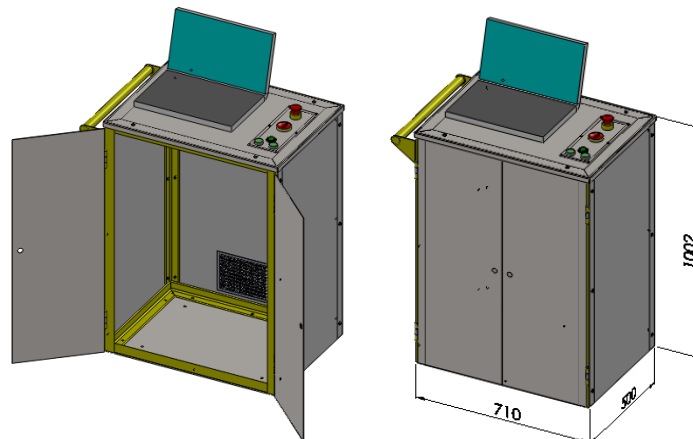


Figura 1.11: Conceito do carro móvel

Esta mesa possui um compartimento inferior para colocar o circuito hidráulico (grupo de potência + válvulas), uma base para colocar um computador portátil e um conjunto de botões (botão de emergência e botões para accionamento manual das válvulas). Como o fabrico desta mesa será mais dispendioso que a compra de uma existente no mercado que sirva para as mesmas circunstâncias, optou-se por comprar a mesa que está ilustrada na figura 1.12.



Figura 1.12: Mesa móvel a adquirir do fabricante FACOM®

Esta mesa é fabricada pela *FACOM*® com a referência 2703PB e tem como principais características:

- Dimensões (C x L x A): 1092 x 617 x 903 mm
- Peso: 54,0 Kg

A este carro serão adaptados o circuito hidráulico, o circuito electrónico e os botões para accionamento manual.

## 1.6.2.2. Circuito hidráulico

A solução encontrada para o circuito hidráulico que irá actuar nos cilindros hidráulicos do conjunto Travessa de Carga/ Travessa Dançante para inclinar a travessa de carga está esquematizada na figura 1.12

Na tabela 1.6 estão identificados todos os componentes identificados na figura 1.12.

Item	Qtd.	Descrição	Fabricante	Referência
1	1	Depósito - 40 L		
2	1	Tampão de enchimento	SOFIMA	TM 478G78
3	1	Indicador óptico de Nível	SOFIMA	LM 127
4	1	Motor Eléctrico - 500W		
5	1	Bomba de Engrenagens	SAUER DANFOSS	SNP 1 / 4,3 DC O 01
6	1	Filtro de Retorno	SOFIMA	RFM 012 CV 1 B 3 01 S
7	1	Filtro de Pressão	HYDAC	MDF 110 OCXX 1,0 / B6
8	1	Manómetro (0-60) bar	WIKA	0-60/63 N
9	1	Válvula Limitadora de Pressão	OLEOSTAR	VMP/B/L 05-38/TS.S
10	1	Válvula Reguladora de Caudal Compensada	HYDAC	SRVR 10-1.1/0
11	1	Válvula Solenóide	OLEOSTAR	VE/B/38/NA
12	1	Válvula Direccional de Gaveta	Rexroth	4 WE 6 H 6X / EG 24 N9 K4
13	1	Válvula de Retenção Pilotada <i>sandwich</i>	Rexroth	Z2S6 - 6X
14	2	Acoplamento Rápido (3/8") (Macho + Fêmea)	CEJN	FP CEJN 3/8" 365
15	2	Cilindros Hidráulicos	Do próprio comboio	

Tabela 1.7: Identificação dos componentes do circuito hidráulico



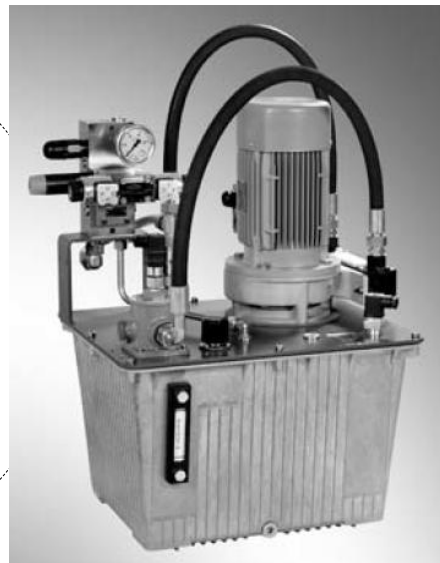
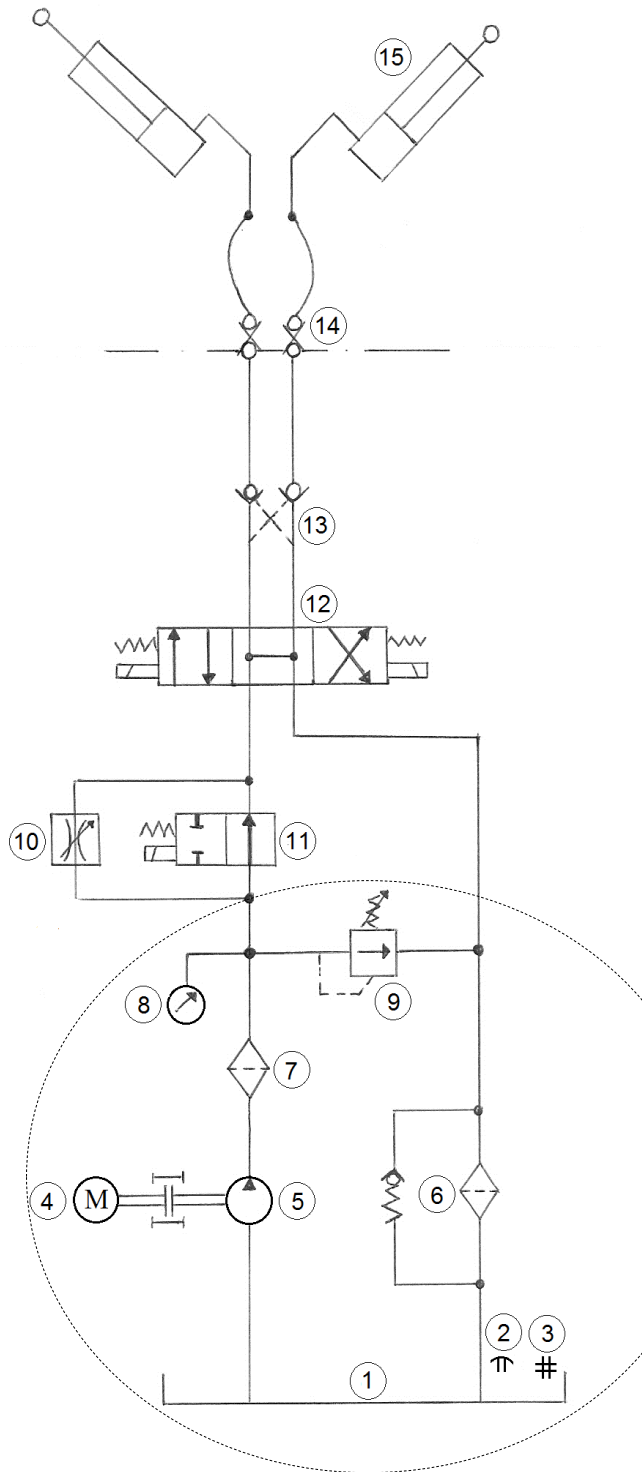


Figura 1.13: Esquema do circuito hidráulico

Este circuito consiste num grupo de potência e num conjunto de válvulas de comando eléctrico.

O grupo de potência possui um reservatório de 40 litros ao qual é acoplado um motor eléctrico (4) e uma bomba hidráulica (5), à saída da bomba é colocado um filtro de pressão (7) para garantir a qualidade do óleo que vai circular nas válvulas e no circuito hidráulico do bogie por forma a evitar a contaminação do circuito do bogie e posteriormente do comboio. Ainda no grupo de potência é colocado um manómetro de pressão (8), uma válvula reguladora de pressão e segurança (9) e um filtro de retorno para filtrar todo o óleo que retorna ao reservatório.

O conjunto de válvulas, possui uma válvula direcciona (12) para inclinar a travessa de carga para um lado ou para o outro, tem uma válvula reguladora de caudal (10) e uma válvula de solenóide (11) em paralelo para controlar a velocidade de inclinação (com a válvula de solenóide em posição normal aberta o óleo passa livremente provocando um avanço rápido, com a válvula solenóide actuada, fechada, o óleo tem de passar pela válvula reguladora de caudal provocando um avanço lento) e tem ainda uma válvula de retenção pilotada (13) para garantir a estanquicidade do circuito e o posicionamento dos cilindros uma vez que a válvula direcciona mesmo fechada não garante.

### **1.6.2.3. Circuito Electrónico**

O circuito electrónico deste banco de ensaios é constituído por uma cadeia de actuação para controlar o circuito hidráulico, e uma cadeia de medida para medir os valores dos ângulos requeridos, ambas controladas por um computador através de uma placa de aquisição de dados (DAQ) da *National Instruments* (USB-6008). A interacção entre o operador e o computador é feita através de um programa concebido e desenvolvido no ambiente LabVIEW, uma vez que é o ambiente de programação indicado para interagir com estas placas de aquisição de dados.

#### **1.6.2.3.1. Cadeia de Actuação**

Para actuar as válvulas direcciona e solenóide através da placa de aquisição de dados é necessário transformar a tensão que sai das portas digitais da placa (5 Vdc) na tensão necessária para actuar os solenóides das válvulas (24 Vdc). A solução encontrada é usar 2 andares de relés: o primeiro relé controla uma tensão de 15Vdc e é actuado pela placa com os 5Vdc, o segundo relé controla então os 24Vdc e é actuado pelos 15Vdc provenientes do primeiro relé.

Na figura 1.14 está representado o circuito desta cadeia de actuação. São precisos 3 circuitos destes: 1 para a válvula solenóide e 2 para a válvula direcciona.

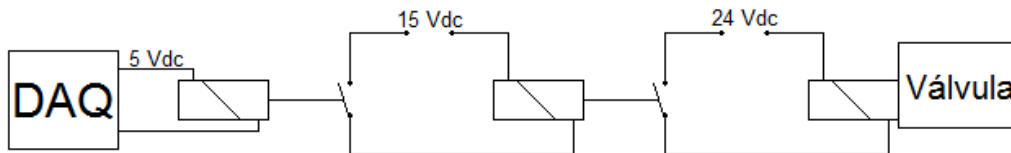


Figura 1.14: Cadeia de Actuação

### 1.6.2.3.2. Cadeia de Medida

Os sensores mais indicados para medir os ângulos pretendidos neste projecto, são sensores do tipo inclinómetros. Estes sensores medem sempre o ângulo entre eles e a vertical.

Consultado o fornecedor destes sensores MRA - Instrumentação, escolheu-se o Inclinómetro SI-701AIHPC do fabricante *Columbia*. Este sensor tem como principais características:

- Gama de medida:  $\pm 5^\circ$ ,  $\pm 10^\circ$ ,  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$
- Gama de corrente de saída: 4...20 mA
- Alimentação: +15 Vdc
- Erro de não-linearidade:  $\pm 0.1\%$  F.R.
- Erro de não repetibilidade:  $\pm 0.1\%$  F.R.
- Erro de resolução: 0.001% F.R.

Na cadeia de medida para os inclinómetros das travessas (figura 1.15), são usados inclinómetros com uma gama de medida de  $\pm 15^\circ$  e na cadeia de medida para os inclinómetros das bielas (figura 1.16) são usados inclinómetros com uma gama de  $\pm 45^\circ$ .

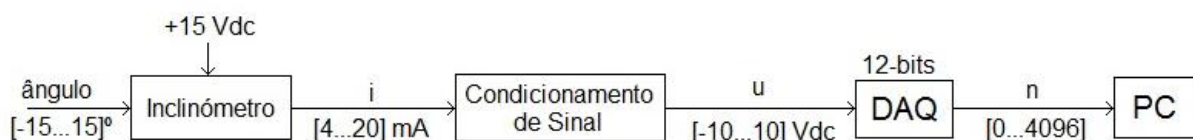


Figura 1.15: Cadeia de Medida dos inclinómetros das travessas

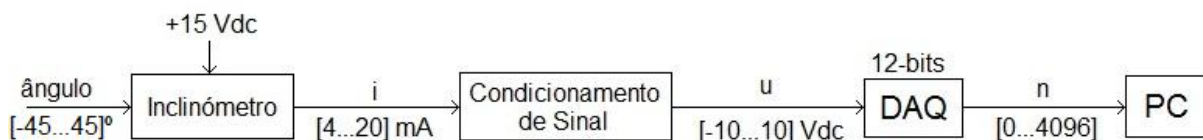


Figura 1.16: Cadeia de Medida dos inclinómetros das bielas

Uma vez que as entradas analógicas da placa apenas permitem um sinal de tensão contínua numa gama de  $\pm 10$ Vdc, tem de se fazer um condicionamento de sinal por forma a

transformar os 4...20 mA em -10...10Vdc. Neste condicionamento de sinal são usados 2 circuitos activos com AmpOp's: o primeiro é um "conversor corrente tensão" e o segundo é um circuito subtrator. Este condicionamento de sinal está ilustrado na figura 1.17.

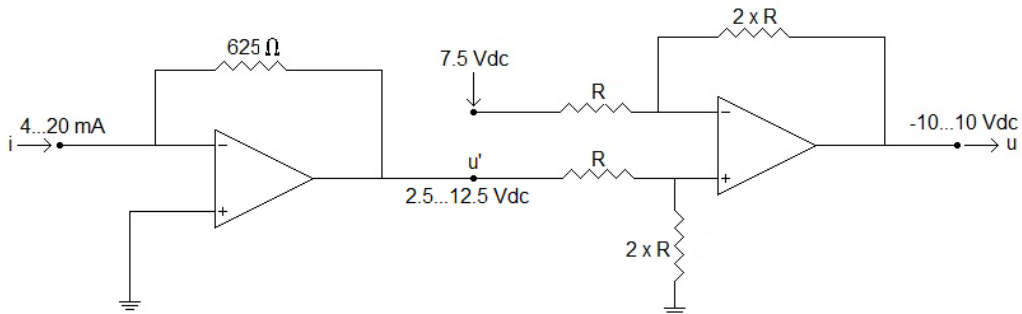


Figura 1.17: Condicionamento de Sinal

### 1.6.2.3.3. Descrição do Programa

Um dos requisitos impostos pela empresa EMEF é que o banco de ensaios realize o ensaio automaticamente, ou seja, através de um simples clique num botão, o banco de ensaios inclina para um lado a travessa de carga em relação à travessa dançante, obtém os valores dos ângulos relativos da inclinação das quatro bielmas e faz o mesmo quando inclina a travessa de carga para o lado oposto imprimindo no fim uma folha com os resultados obtidos no ensaio.

O valor indicado pelo fabricante do bogie do deslocamento angular da travessa de carga em relação à travessa dançante deverá ser de  $8^\circ$  para que o deslocamento angular das bielmas seja de  $25^\circ$  e  $31^\circ$

Com este objectivo é elaborado um programa que controlará o ensaio, descrito no algoritmo:

- Descrição dos objectos a manipular
  1. Válvula direcciona (Item 12 da figura 1.13);
  2. Válvula solenóide (Item 11 da figura 1.13);
  3. Valor do ângulo que a travessa de carga deverá inclinar em relação à travessa dançante
  4. Valores dos ângulos dos 6 inclinómetros (1 inclinómetro por biela, 1 inclinómetro para a travessa de carga e 1 inclinómetro para a travessa dançante)
- Descrição das acções a executar
  1. O operador indica o ângulo que a travessa de carga deverá inclinar em relação à travessa dançante ( $8^\circ$  por defeito);
  2. Início do ensaio com um clique no botão "Iniciar Ensaio";

3. O programa inicia a leitura contínua dos valores dos ângulos dos 6 inclinómetros;
4. Compara o valor do inclinómetro da travessa de carga com o valor do inclinómetro da travessa dançante;
5. Actua na válvula direcciona e na válvula solenóide para igualar o valor do inclinómetro da travessa de carga ao valor do inclinómetro da travessa dançante com precisão;
6. Memoriza a diferença dos inclinómetros das travessas e os valores dos inclinómetros das quatro bielãs;
7. Actua na válvula direcciona para inclinar a travessa de carga em relação à travessa dançante, ao mesmo tempo que compara o ângulo de inclinação instantâneo com o pretendido;
8. Acciona a válvula solenóide quando a diferença do ângulo de inclinação instantâneo com o ângulo pretendido for menor que  $2^\circ$  para uma inclinação lenta a fim de garantir precisão nos resultados obtidos;
9. Atingida a inclinação pretendida da travessa de carga ( $8^\circ$ ), lê os valores dos inclinómetros das 4 bielãs e subtrai o valor inicial memorizado a fim de obter o valor relativo de inclinação.
10. Actua na válvula direcciona para inclinar a travessa de carga para o lado oposto;
11. Acciona a válvula solenóide quando a diferença do ângulo de inclinação instantâneo com o ângulo pretendido for menor que  $2^\circ$ ;
12. Atingida a inclinação pretendida da travessa de carga do lado oposto, volta a ler os valores dos inclinómetros das 4 bielãs e volta a subtrair o valor inicial memorizado a fim de obter o valor relativo de inclinação do lado oposto.
13. Acciona a válvula direcciona para colocar as travessas paralelas.
14. Mostra ao operador os resultados obtidos para este os guardar sempre num ficheiro e/ou imprimir.

## 1.7. Montagem e fabrico da estrutura de suporte

Neste capítulo está descrito o processo de montagem e fabrico da estrutura de suporte.

1. Fabricar algumas peças que estão identificadas nos desenhos técnicos da estrutura e comprar as restantes (parafusos e olhais).
2. Com as peças números 2 e 9 montar os 2 cavaletes como mostra a figura 1.18.

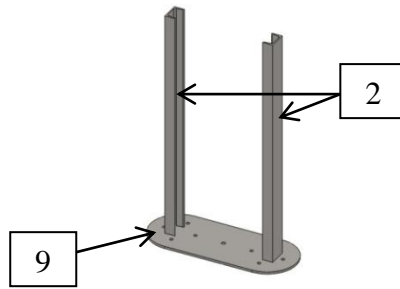


Figura 1.18: Montagem do Cavalete

3. Soldar uma cantoneira aos 2 cavaletes por forma a garantir o posicionamento relativo dos furos durante o fabrico da estrutura, como ilustra a figura 1.19.



Figura 1.19: Posicionamento relativo dos dois cavaletes

4. De seguida soldam-se as peças número 4 para ligar os 2 cavaletes garantindo a posição relativa entre eles como ilustra a figura 1.20.

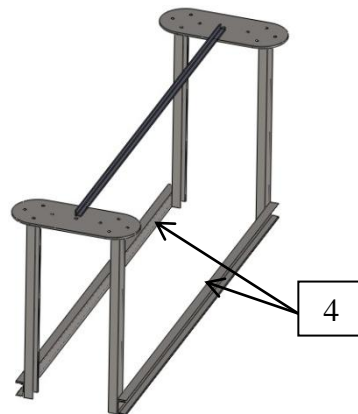


Figura 1.20: Montagem das vigas longitudinais da base

5. Estando os 2 cavaletes ligados um ao outro e na devida posição relativa, acaba-se de formar a base soldando as peças número 1 como mostra a figura 1.21.

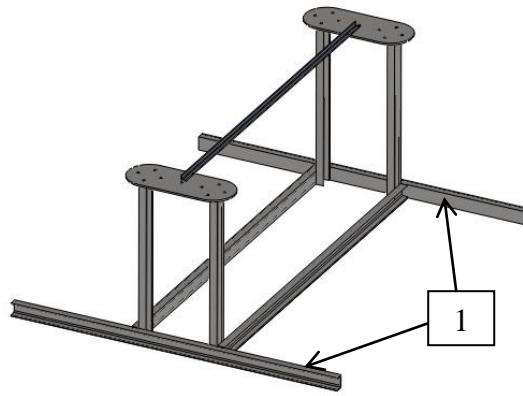


Figura 1.21: Montagem das vigas transversais da base

6. Concluídos os cavaletes e a base, soldam-se todas as cantoneiras de reforço (peças números 3, 5, 6, 7 e 8) dando origem a uma estrutura conforme a da figura 1.22.



Figura 1.22: Montagem dos elementos de cantoneiras

7. Para finalizar, retira-se a cantoneira adicionada no passo 3, procede-se a uma limpeza e desengorduramento da estrutura, aplica-se primário, pinta-se com tinta de acabamento e montam-se os 2 olhais e os 4 apoios nas respectivas posições, dando origem à estrutura final ilustrada na figura 1.23.

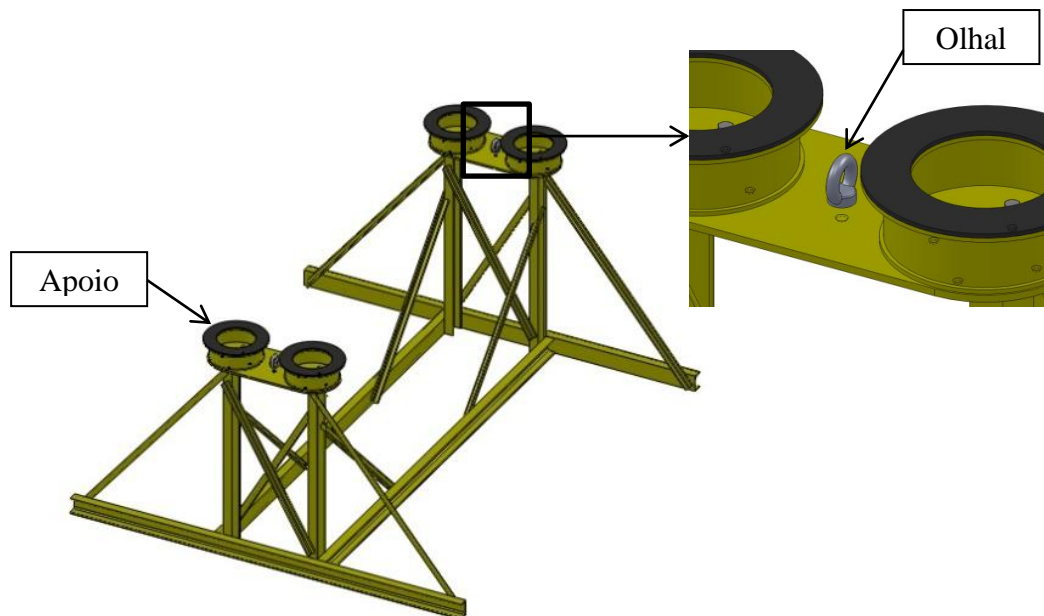


Figura 1.23: Montagem Final com detalhe do olhal

## 1.8. Estimativa de Custos

O fabrico deste banco de ensaios tem custos associados ao fabrico da estrutura de suporte, à aquisição do carro móvel, à montagem do circuito hidráulico e ao fabrico do circuito electrónico.

Para o cálculo dos custos de fabrico da estrutura de suporte, foram tidos em conta os custos e os tempos de fabrico da empresa EMEF. A matéria-prima será a existente no armazém. Caso não exista em stock, será comprada e o que sobrar ficará em stock para outro fim não sendo por isso contabilizado o desperdício de material.

Assim temos os seguintes custos unitários:

- Matéria-prima (Aço estrutural): 0.6 €/Kg;
- Transformação da matéria-prima: 1 €/Kg;
- Custo de montagem (mão-de-obra): 31.5 €/h;

Para o tempo de fabrico, a empresa alega 70 h/ton.

Tendo em conta que a estrutura pesa cerca de 180 Kg, obtem-se um tempo de fabrico de:

$$\text{Tempo total da montagem} = 70 \left[ \frac{h}{ton} \right] \div 1000 \left[ \frac{Kg}{ton} \right] \times 180 [Kg] = 12.6 [h]$$

A tabela 1.7 apresenta os custos do fabrico da estrutura de suporte.



	Custo unitário	Quantidade	Total
Matéria-prima	0,6 €/Kg	180 Kg	108,00 €
Transformação	1 €/Kg	180 Kg	180,00 €
Mão-de-obra	31,5 €/h	12,6 h	396,90 €
Total			684,90 €

Tabela 1.8: Estimativa de custos do fabrico da estrutura de suporte

Para se saber o custo de aquisição de um carro móvel foi consultado o catálogo do fabricante FACOM<sup>®</sup>.

A tabela 1.8 apresenta a referência e o custo do carro móvel.

Quantidade	Descrição	Fabricante	Referência	Preço
1	Carrinho para cargas pesadas	FACOM <sup>®</sup>	2703PB	589 €

Tabela 1.9: Custo de aquisição do carro móvel

Quanto ao circuito hidráulico, foi contactada a empresa CUDELL<sup>®</sup> - Engenharia & Serviços, com o intuito de verificar os componentes existentes no mercado e os seus custos de aquisição. A empresa CUDELL<sup>®</sup> vende todos os componentes montados em dois conjuntos: um grupo de potência e uma placa com todas as válvulas acopladas. Os custos de aquisição destes dois conjuntos, está detalhado na tabela 1.9.

Nº Desenho	Qtd	Descrição	Fabricante	Referência	Preço Unitário
1	1	Depósito - 40 L			
2	1	Tampão de enchimento	SOFIMA	TM 478G78	17,47 €
3	1	Indicador óptico de Nível	SOFIMA	LM 127	22,07 €
4	1	Motor Eléctrio - 500W			150,00 €
5	1	Bomba de Engrenagens	SAUER DANFOSS	SNP 1 / 4,3 DC O 01	185,71 €
6	1	Filtro de Retorno	SOFIMA	RFM 012 CV 1 B 3 01 S	35,79 €
7	1	Filtro de Pressão	HYDAC	MDF 110 OCXX 1,0 / B6	316,74 €
8	1	Manómetro (0-60) bar	WIKA	0-60/63 N	25,59 €
9	1	Válvula Limitadora de Pressão	OLEOSTAR	VMP/B/L 05-38/TS.S	66,22 €
10	1	Válvula Solenóide	OLEOSTAR	VE/B/38/NA	144,40 €
11	1	Válvula Reguladora de Caudal Compensada	HYDAC	SRVR 10-1.1/0	296,16 €
12	1	Válvula Direcional de Gaveta	Rexroth	4 WE 6 H 6X / EG 24 N9 K4	333,59 €
13	1	Válvula de Retenção Pilotada sandwich	Rexroth	Z2S6 - 6X	387,81 €
14	2	Acoplamento Rápido Macho (3/8")	CEJN	Macho FP CEJN 3/8" 365	16,17 €
14	2	Acoplamento Rápido Fêmea (3/8")	CEJN	Fêmea FP CEJN 3/8" 365	31,00 €
	1	Bloco para Válvulas		2XTN6	156,78 €
		Material Diverso (junções e tubagens)			500,00 €

Total	2.732,67 €
-------	------------

Tabela 1.10: Estimativa de custos do fabrico do circuito hidráulico

Na tabela 1.10 está uma lista de compras e os preços encontrados para os componentes do circuito electrónico. Foi feita uma pesquisa *online* no fornecedor RS Components e no fabricante LEGRAND para obter os preços dos principais componentes.

A estes custos acrescem os custos de mão-de-obra do fabrico dos circuitos impressos e da montagem dos vários componentes bem como da realização de testes e calibragem do equipamento.

Qtd.	Descrição	Fabricante	Referência	Preço unitário
1	Placa de Aquisição de dados (DAQ)	National Instruments	USB-6008	169.00 €
6	Sensor (Inclinómetro)	Columbia	SI-701AIHPC	1568.25 €
1	Transformador (230V – 24V)	-	RS 10-5929	73.30 €
1	Transformador (230V – 15V)	-	RS 10-5869	14.57 €
1	Transformador (2:1) (15V – 7.5)	-	-	-
3	Relé	Panasonic	ASX210A4H	8.63 €
3	Relé	Tyco Electronics	V23026A1003B201	3.40 €
12	AMPOP	Texas Instruments	TLC 252 CP	3.98 €
6	Resistência - 625 $\Omega$	-	-	-
36	Resistência	-	-	-
1	Botão “cabeça cogumelo” (Emergência)	LEGRAND	237 26	17.53 €
2	Botão de pressão	LEGRAND	237 02	9.20 €
1	Interruptor de Chave	LEGRAND	239 54	15.31 €
1	Interruptor rotativo	LEGRAND	237 30	10.05 €
1	Computador Portátil	-	-	400.00€
<b>Total</b>				<b>10.498,17 €</b>

Tabela 1.11: Estimativa de custos do fabrico do circuito hidráulico

A estimativa do custo total de fabrico é então:

	Custo
Estrutura de Suporte	684,90 €
Carro Móvel	589 €
Circuito Hidráulico	2.732,67 €
Circuito Electrónico	10.498,17 €
<b>Total</b>	<b>14.504,74 €</b>

Tabela 1.12: Estimativa de custos do fabrico do banco de ensaios



## 2. Notas de Cálculo

### 2.1. Introdução

Neste capítulo são apresentadas todas as notas de cálculo realizadas durante a fase de projecto do banco de ensaios. Primeiro apresenta-se todo o projecto da estrutura de suporte pelo método proposto no Eurocódigo 3 e pelo Método dos Elementos Finitos e depois apresentam-se os cálculos do projecto do circuito hidráulico e do circuito electrónico

### 2.2. Estrutura de Suporte do Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante

#### 2.2.1. Geração de Conceito

A actual estrutura de suporte existente na EMEF apresenta desvantagens significativas como o tempo de *setup* do ensaio bastante elevado onde têm de ser 2 operadores a colocar, alinhar e aparafusar o conjunto de travessas à estrutura de suporte e o facto de não garantir que evita o capotamento em caso de acidente ou sismo, pondo em risco a segurança dos operadores.

Assim pensou-se em fabricar uma nova estrutura que não possua estas desvantagens. Para reduzir o tempo de *setup* pensou-se em utilizar os apoios das molas da suspensão secundária (ver figura 2.2) para apoiar o conjunto de travessas na estrutura de suporte, em que apenas um operador com um dispositivo de elevação de cargas consegue elevar o conjunto de travessas e apoiá-lo na estrutura num curto espaço de tempo. O primeiro conceito desenvolvido para a estrutura está ilustrado na figura 2.1.

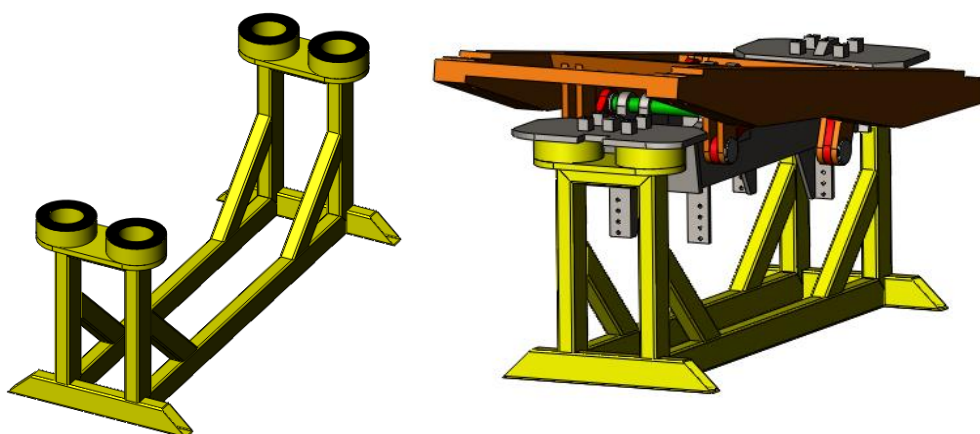


Figura 2.1: Primeiro conceito da estrutura de suporte



a)

b)

Figura 2.2: Detalhe da suspensão secundária

- a) Detalhe das molas da suspensão secundária
- b) Apoio das molas da suspensão secundária

Esta estrutura foi feita com os mesmos perfis da estrutura já existente na EMEF. No entanto apesar de robusta era muito pesada e era feita de perfis fechados o que aumentaria o seu custo de produção. Também não garantia que evitava o capotamento em caso de acidente ou sismo.

Por fim pegando na mesma ideia mas com perfis abertos “U” e cantoneira e com uma base mais larga chegámos à estrutura final.

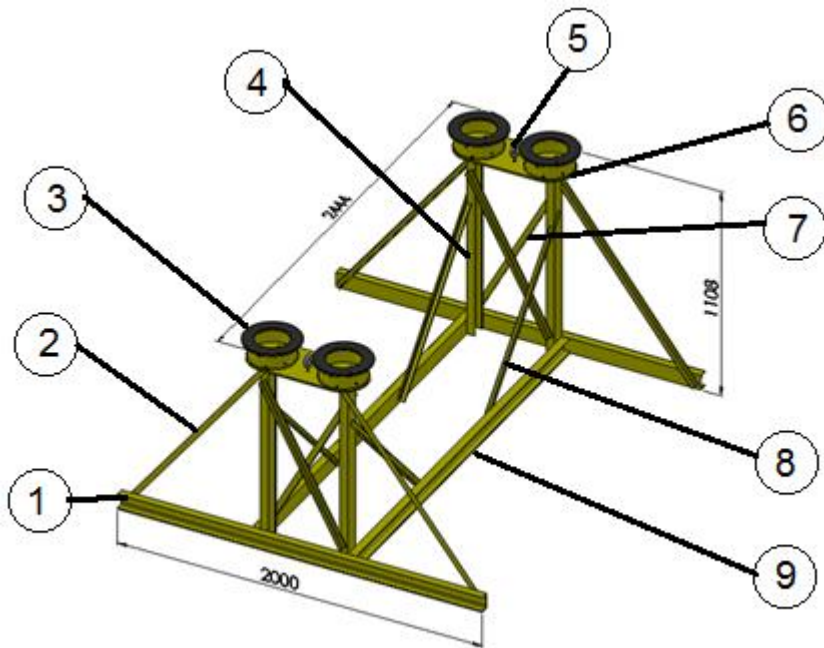


Figura 2.3: Conceito final da estrutura de suporte

Na tabela 2.1 está a legenda da figura 2.3.

Item	Descrição
1	Travessa transversal da base
2	Cantoneira de reforço para evitar a queda lateral
3	Apoio
4	Coluna
5	Olhal
6	Placa de fixar os apoios
7	Cantoneira de reforço da rigidez transversal
8	Cantoneira de reforço da rigidez longitudinal
9	Travessa longitudinal da base

Tabela 2.1: Legenda da figura 2.3.

Esta estrutura já é mais leve e evita o capotamento em caso de acidente.

## 2.2.2. Método Utilizado na Análise Estrutural

Na análise estrutural da estrutura é usado o método proposto pelo Eurocódigo 3, simplificando a estrutura, considerando que todos os componentes com perfil de cantoneira são barras e que os componentes de perfil UPN são vigas simplesmente apoiadas. Em relação à resistência dos vários elementos, verifica-se a resistência do perfil UPN mais pequeno do mercado (UPN 80), determina-se qual a cantoneira a utilizar com espessura  $t \geq 4$  mm, verifica-se a resistência dos apoios e verificam-se as ligações soldadas e ligações com parafusos.

Para garantir a fiabilidade dos resultados obtidos com as simplificações, usa-se um Método Numérico (Método dos Elementos Finitos) para comparar resultados.

## 2.2.3. Propriedades do Material

Para o aço estrutural, o Eurocódigo 3 define as seguintes propriedades do material:

- Módulo de Elasticidade  $E = 210 \text{ GPa}$
- Coefficiente de Poisson em regime elástico  $\nu = 0.3$

Consultando o catálogo de produtos da empresa FERPINTA – Ind. Tubo Aço de F.P.T., S.A., verifica-se que todos os perfis podem ser fabricados a partir do aço S235JR segundo a norma EN 10025-2. Assim sendo consultando a tabela 1.1, obtém-se as seguintes propriedades para o material:

Norma e classe do aço	Espessura nominal $t$ do componente da secção [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_u$ [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_u$ [MPa]
<b>EN 10025-2</b> S 235	235	360	215	360

Tabela 2.2: Propriedades do aço a utilizar (S235 - EN10025-2)

## 2.2.4. Cálculo Estrutural pelo Eurocódigo 3

### 2.2.4.1. Simplificação e Carregamentos

Uma vez que a estrutura é híper-estática, no cálculo estrutural são feitas algumas simplificações:

- A estrutura é tratada como uma treliça em que nos nós não há momentos de reacção;
- Os componentes de perfil UPN (colunas e base) são tratados como vigas;
- Os componentes de perfil cantoneira (reforços de rigidez) são tratados como barras;

Em termos de carregamentos, a estrutura, em condições normais de utilização, apenas suporta uma força vertical do peso do conjunto das travessas. Em caso de acidente ou de sismo considera-se para além da força vertical do peso das travessas, uma força lateral igual a 30% do peso do conjunto das travessas que pode actuar em qualquer direcção horizontal, apenas devida ao atrito que existe entre a base da estrutura e o chão.

Na imagem seguinte apresenta-se o esquema simplificado da estrutura com os componentes identificados com minúsculas, os nós identificados com maiúsculas e a posição dos carregamentos.

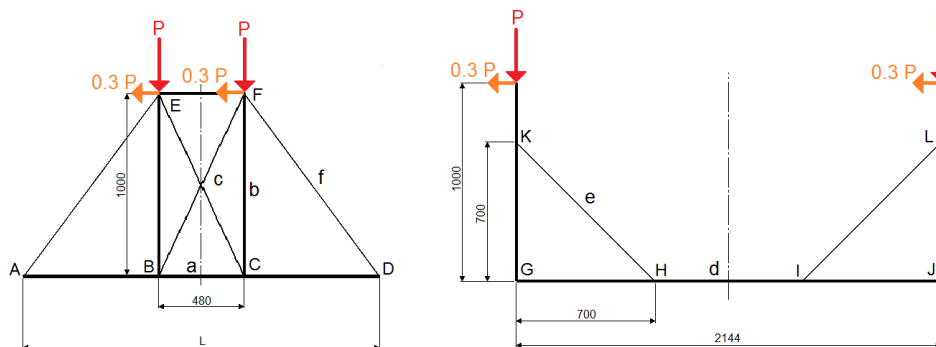


Figura 2.4: Diagrama de Corpo Livre da estrutura

O valor da força "P" é o peso total do conjunto das duas travessas e dos 2 cilindros hidráulicos dividido pelos quatro apoios.

Na tabela 2.2 são apresentados os pesos dos componentes do conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante.

Travessa de carga	693 Kg
Travessa Dançante	814 Kg
Cilindros hidráulicos	2 x 23 Kg
Total	1553 Kg



Tabela 2.3: Peso do Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante

Assim temos:

- $P = \frac{1553 \text{ Kg}}{4} = 388.25 \text{ Kg}$
- $P = 388.25 \text{ Kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \cong 3805 \text{ N}$
- $0.3 P = 1141.5 \text{ N}$

## 2.2.4.2. Perfis Utilizados

Neste método, começa-se por atribuir uma secção aos componentes e depois verifica-se a sua resistência. Aos componentes “a”, “b” e “d” é atribuído o perfil UPN 80 sendo o perfil UPN o de menor resistência da tabela do fabricante. Aos componentes “c”, “e” e “f” é atribuído o perfil de cantoneira 30x30x4 uma vez que à partida parece ser dos mais adequados para o efeito.

Nos apoios são usadas chapas de espessura 6 mm e um tubo com 244.5 mm de diâmetro e espessura 6mm.

Nos Anexos A, B e C são apresentados extractos do catálogo do fabricante FERPINTA – Ind. Tubo Aço de F.P.T., S.A..

Na Figura 2.5 estão representados os dois tipos de perfis para definir a nomenclatura das dimensões dos perfis utilizados.

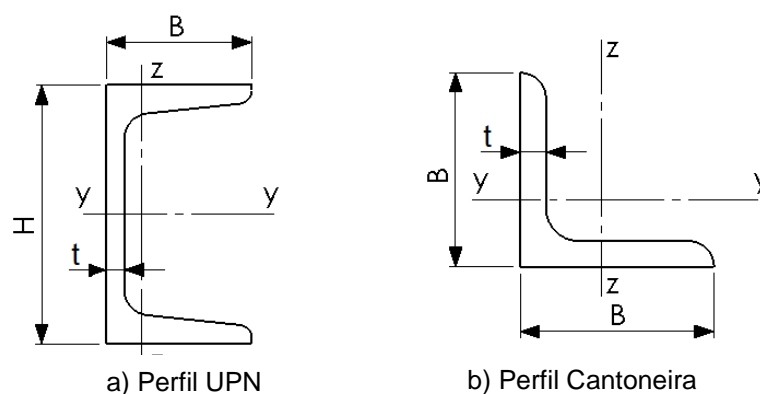


Figura 2.5: Perfis utilizados nos elementos da estrutura

Nas tabelas 2.3 e 2.4 apresentam-se as principais características dos perfis utilizados.

Perfil	H [mm]	B [mm]	t [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	I <sub>uu</sub> [mm <sup>4</sup> ]	I <sub>vv</sub> [mm <sup>4</sup> ]	Massa Linear [kg/m]
UPN 80	80	45	6	1100	1.06x10 <sup>6</sup>	194x10 <sup>3</sup>	8.64
L	30	30	4	225	28.5x10 <sup>3</sup>	18x10 <sup>3</sup>	1.77

Tabela 2.4: Propriedades das secções dos perfis UPN 80 e Cantoneira

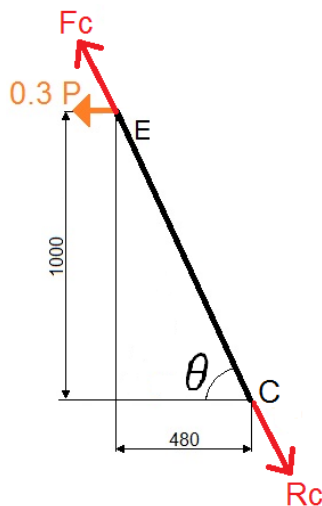
Perfil	D [mm]	t [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	I [mm <sup>4</sup> ]	Massa Linear [kg/m]
Tubo	244.5	6	4500	31.99x10 <sup>6</sup>	35.30

Tabela 2.5: Propriedades da seção do tubo D244.5

### 2.2.4.3. Resistência dos Elementos

Nesta secção verificam-se os factores de segurança da resistência das secções dos componentes “a”, “b”, “c”, “d”, “e” e “f” e calcula-se o comprimento L do componente “a” por forma a ter a estabilidade necessária.

- **Componente “c” ou 7 (ver figura 2.3):** este componente é tratado como uma barra com o perfil cantoneira que suporta todo o esforço 0.3 P na direcção transversal.



$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{1000}{480}\right) = 64.36^\circ$$

A força exercida na barra “c” é dada por:

$$F_c = \frac{0.3P}{\cos \theta} = \frac{0.3 \times 3805}{\cos 64.36^\circ} \cong 2638 \text{ N}$$

A tensão normal na barra “c” é dada por:

$$\sigma_N = \frac{F_c}{A_c} = \frac{2638}{225} \cong 11.72 \text{ MPa}$$

O factor de segurança é igual a:

$$n = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_N} = \frac{235}{11.72} \cong 20$$

Figura 2.6: DCL do elemento “c”

Como estas barras tanto estão à tracção como à compressão, tem de se verificar a carga crítica de instabilidade:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = \frac{\pi^2 \times 210000 \times 18000}{1109^2} \cong 30333 \text{ N}$$

$$\text{Factor de segurança de instabilidade: } n_i = \frac{P_{cr}}{F_c} = \frac{30333}{2638} \cong 11.5$$

Verifica-se que as barras “c” nunca instabilizam pois  $F_c \ll P_{cr}$ .

- **Componente “b” ou 4 (ver figura 2.3):** Este componente é tratado como uma viga com o perfil UPN 80 que suporta o esforço axial P e o esforço 0.3P na direcção longitudinal. Está simplesmente apoiada nos pontos G e K. O ponto K é o nó de ligação do componente “b” com o componente “e”.

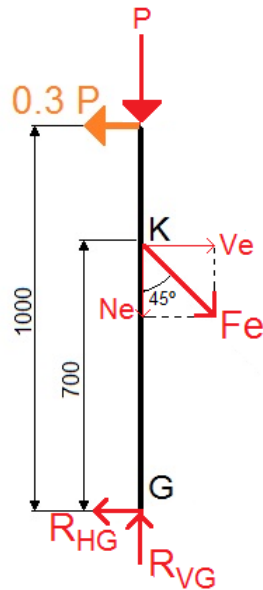


Figura 2.7: DCL do elemento "b"

Cálculo de reacções nos apoios pelas equações de equilíbrio estático:

$$\sum F_v = 0 \Leftrightarrow -P - Ne + R_{VG} = 0$$

$$\sum F_H = 0 \Leftrightarrow -0.3P + Ve - R_{HG} = 0$$

$$\sum M_G = 0 \Leftrightarrow 0.3P \times 1000 - Ve \times 700 = 0$$

$$Ne = Ve = Fe \cos(45^\circ)$$

Resolvendo o sistema de 4 equações tem-se:

$$Ve = Ne \cong 1631 \text{ N}$$

$$R_{VG} = 5436 \text{ N}$$

$$R_{HG} = 488.5 \text{ N}$$

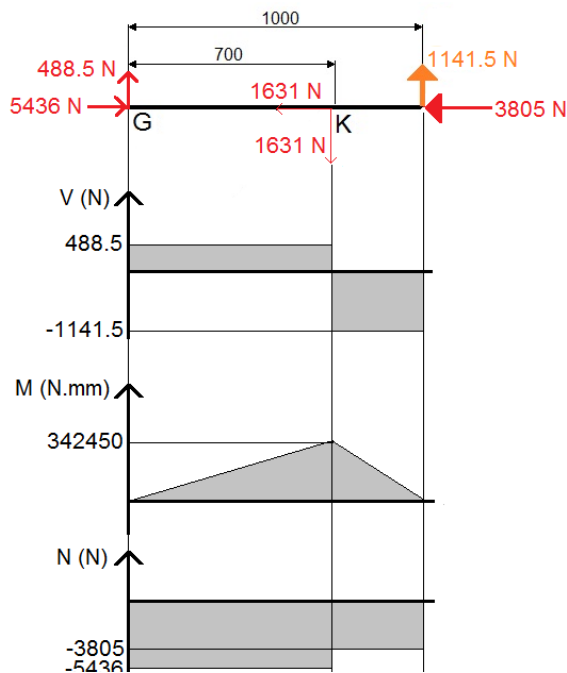


Figura 2.8: Diagrama de esforços do elemento "b"

Através do diagrama de esforços verifica-se que o ponto crítico é o K:

$$V = 1141.5 \text{ N}$$

$$M = 342450 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$N = 5436 \text{ N}$$

Cálculo da tensão devida ao momento flector:

$$\sigma_M = \frac{M y}{I_{yy}} = \frac{342450 \times 40}{1.06 \times 10^6} \cong \pm 12.9 \text{ MPa}$$

Cálculo da tensão devida ao esforço axial:

$$\sigma_N = \frac{N}{A} = \frac{-5436}{1100} = -4.9 \text{ MPa}$$

Como a viga é esbelta ( $\frac{L}{H} = \frac{1000}{80} = 12.5 > 10$ ), não é necessário ter em conta as tensões de corte provocadas pelo esforço transversal.

Assim, a tensão equivalente de von Mises vale:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{(\sigma_N + \sigma_M)^2} \cong 17.8 \text{ MPa}$$

Com um coeficiente de segurança  $n = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{VM}} = \frac{235}{17.8} \cong 13.2$

Como esta viga está à compressão, tem de se verificar a carga crítica de instabilidade:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = \frac{\pi^2 \times 210000 \times 194000}{1000^2} \cong 402087 \text{ N}$$

Factor de segurança de instabilidade:  $n_i = \frac{P_{cr}}{N} = \frac{402087}{5436} \cong 74$

Verifica-se que as vigas “b” nunca instabilizam pois  $N \ll P_{cr}$ .

- **Componente “e” ou 8 (ver figura 2.3):** este componente também é tratado como uma barra com o perfil cantoneira mas que suporta todo o esforço  $0.3 P$  na direcção longitudinal.

Da análise do componente “b” retira-se directamente a força  $F_e$  a que o componente “e” está sujeito.

$$F_e = \frac{Ne}{\cos(45^\circ)} = \frac{1631}{\cos(45^\circ)} \cong 2307 \text{ N}$$

A tensão normal provocada por esta força vale:

$$\sigma_N = \frac{F_e}{Ac} = \frac{2307}{225} \cong 10.25 \text{ MPa}$$

O factor de segurança é igual a:

$$n = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_N} = \frac{235}{10.25} \cong 23$$

Como estas barras para além de trabalharem à tracção também trabalham à compressão, tem de se verificar a carga crítica de instabilidade:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = \frac{\pi^2 \times 210000 \times 18000}{990^2} \cong 38064 \text{ N}$$

Factor de segurança de instabilidade:  $n_i = \frac{P_{cr}}{F_e} = \frac{38064}{2307} \cong 16.5$

Verifica-se que as barras “e” também nunca instabilizam pois  $F_e \ll P_{cr}$ .

- **Componente “d” ou 9 (ver figura 2.3):** Este componente é a viga longitudinal da base com o perfil UPN 80 que devido aos esforços impostos pelos componentes “e”, está sujeita a alguma flexão. Está apoiada nas extremidades G e J pelo que os esforços impostos pelo componente “b” são anulados directamente pelos apoios.

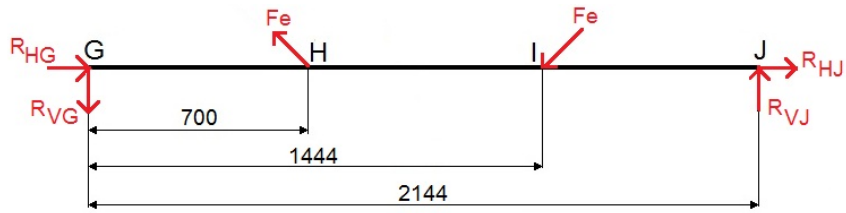


Figura 2.9: DCL do elemento "d"

Pelas equações de equilíbrio estático, calculam-se os valores das reacções nos apoios:

$$\sum F_v = 0 \Leftrightarrow -R_{VG} + Fe \sin(45^\circ) - Fe \sin(45^\circ) + R_{VJ} = 0$$

$$\sum F_H = 0 \Leftrightarrow R_{HG} - Fe \cos(45^\circ) - Fe \cos(45^\circ) + R_{HJ} = 0$$

$$\sum M_G = 0 \Leftrightarrow Fe \sin(45^\circ) \times 700 - Fe \sin(45^\circ) \times 1444 + R_{VJ} \times 2144 = 0$$

$$R_{HG} = R_{HJ} \text{ (reacções horizontais divididas igualmente pelos 2 apoios)}$$

Resolvendo o sistema de equações obtém-se:

$$R_{HG} = R_{HJ} \cong 1631 \text{ N}$$

$$R_{VG} = R_{VJ} \cong 566 \text{ N}$$

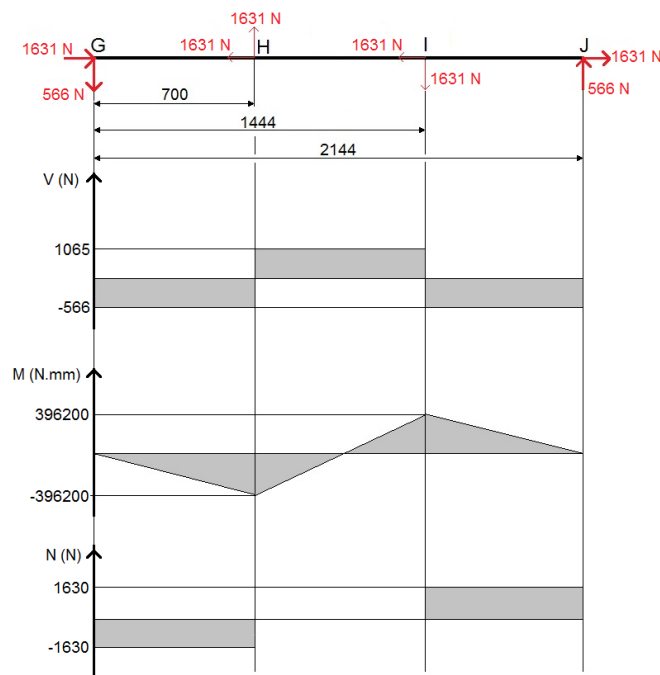


Figura 2.10: Diagrama de esforços do elemento "d"

Através do diagrama de esforços verifica-se que esta viga tem dois pontos críticos (H e J) com iguais valores de esforços:

$$V = 1065 \text{ N}$$

$$M = 396200 \text{ N.mm}$$

$$N = 1630 \text{ N}$$

Cálculo de tensões devidas ao momento flector:

$$\sigma_M = \frac{M y}{I_{yy}} = \frac{396200 \times 40}{1.06 \times 10^6} \cong \pm 14.95 \text{ MPa}$$

Cálculo de tensões devidas ao esforço axial:

$$\sigma_N = \frac{N}{A} = \frac{1630}{1100} = 1.48 \text{ N}$$

Como a viga é esbelta ( $\frac{L}{H} = \frac{2144}{80} = 26.8 > 10$ ), não é necessário ter em conta as tensões de corte provocadas pelo esforço transversal.

Assim, a tensão equivalente de von Mises vale:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{(\sigma_N + \sigma_M)^2} \cong 16.43 \text{ MPa}$$

Com um coeficiente de segurança  $n = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{VM}} = \frac{235}{16.43} \cong 14.3$

- **Componente “a” ou 1 (ver figura 2.3):** este componente é a viga transversal da base com o perfil UPN 80. Tem de ter um comprimento L suficiente para evitar o capotamento da estrutura a suportar o conjunto de travessas.

O comprimento L é calculado para a situação limite em que a estrutura juntamente com o conjunto de travessas só poderá capotar quando for atingida uma inclinação superior a 45° com a horizontal. Para garantir esta condição, o centro de gravidade da estrutura a suportar o conjunto, tem de estar alinhado verticalmente com um dos apoios laterais quando a estrutura estiver inclinada 45° com a horizontal.

Como a força da gravidade resulta de um campo gravítico uniforme, o centro de gravidade coincide com o centro de massa. O centro de massa da estrutura a suportar as travessas, é obtido utilizando o *software* SolidWorks®. Como ainda não se sabe ao certo o peso total da estrutura uma vez que este depende do comprimento L, admite-se um comprimento L de 2000 mm (ver figura 2.11).

Assim obtemos uma aproximação da localização do centro de massa conforme está ilustrado na figura 2.10.

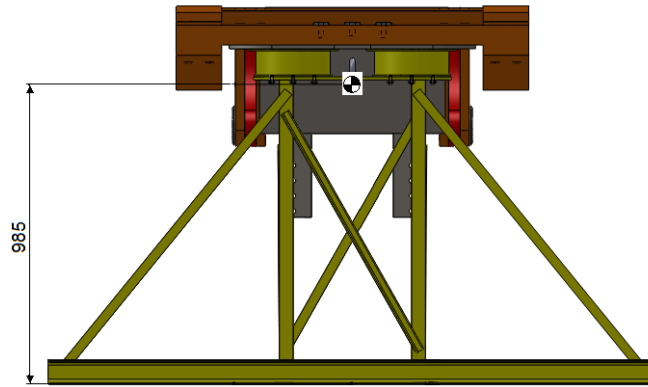


Figura 2.11: Posicionamento do centro de massa

Com a posição do centro de massa verifica-se qual o ângulo que alinha verticalmente o centro de massa com um dos apoios. Através de relações geométricas, verifica-se que para  $L = 2000$  mm o ângulo com a horizontal que evita o capotamento é de  $45.6^\circ$ . Assim se conclui que por este método o comprimento  $L$  do componente “a” deve ser de 2000 mm.

O peso total da estrutura com o conjunto de travessas é de 1733 Kg.

	Peso (Kg)
Estrutura de suporte	180
Conjunto Travessa de Carga/Travessa Dançante	1553
Total	1733

Tabela 2.6: Peso total da estrutura com o conjunto de travessas

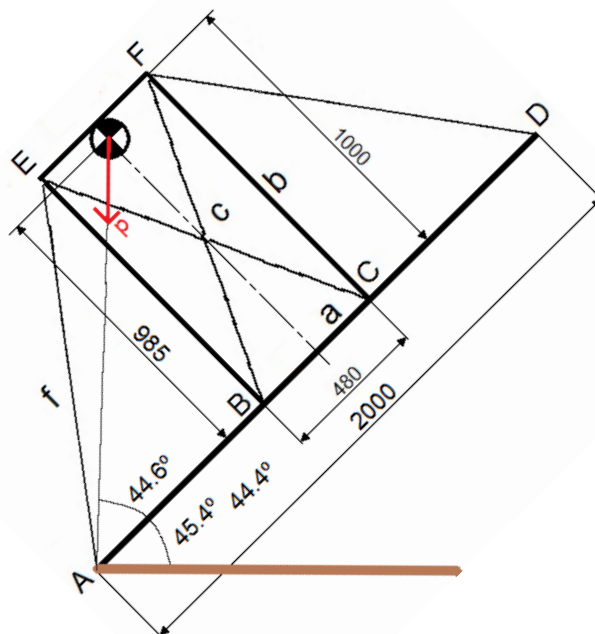


Figura 2.12: Estrutura inclinada a  $45^\circ$

Sem o componente "f", é o componente "a" que suporta todo o esforço nesta situação. Neste caso os cavaletes comportam-se como corpos rígidos impondo em B um momento flector, um esforço transverso e um esforço axial como mostra a figura 2.13.

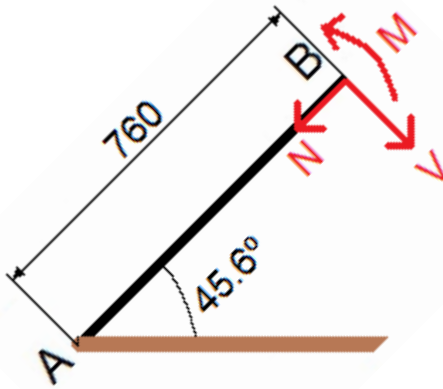


Figura 2.13: DCL do elemento "a"

Cada cavalete suporta metade do peso p.

$$p/2 = \frac{1733}{2} = 866.5 \text{ Kg}$$

$$p/2 = 866.5 \times 9.8 = 8491.7 \text{ N}$$

Resultando nos seguintes esforços:

$$M = p/2 \times \cos(44.6^\circ) \times 985 - p/2 \times \sin(44.6^\circ) \times 240 =$$

$$M = 4.52 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$V = p/2 \times \sin(44.6^\circ) \cong 5941 \text{ N}$$

$$N = p/2 \times \cos(44.6^\circ) \cong 6067 \text{ N}$$

Cálculo de tensões devidas ao momento flector:

$$\sigma_M = \frac{M y}{I_{yy}} = \frac{4.52 \times 10^6 \times 40}{1.06 \times 10^6} \cong \pm 170.6 \text{ MPa}$$

Cálculo de tensões devidas ao esforço axial:

$$\sigma_N = \frac{N}{A} = \frac{-6067}{1100} \cong -5.5 \text{ N}$$

Como a viga é praticamente esbelta ( $\frac{L}{H} = \frac{760}{80} = 9.5 \cong 10$ ), não é necessário ter em conta as tensões de corte provocadas pelo esforço transverso.

Assim, a tensão equivalente de von Mises vale:

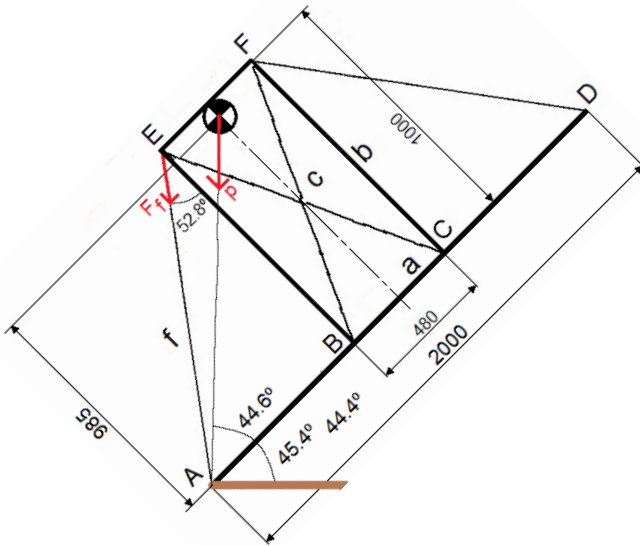
$$\sigma_{VM} = \sqrt{(\sigma_N + \sigma_M)^2} \cong 176.1 \text{ MPa}$$

$$\text{Com um coeficiente de segurança } n = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{VM}} = \frac{235}{176.1} \cong 1.33$$

Como este coeficiente de 1.33 é baixo, é introduzido o componente "f" para suportar o esforço do peso juntamente com o componente "a" quando a estrutura está inclinada..

- **Componente "f" ou 2 (ver figura 2.3):** este componente é então adicionado para aumentar o coeficiente de segurança de 1.33. É tratado como uma barra com perfil cantoneira e é verificada a sua resistência na condição de suportar todo o esforço devido a p.





Para calcular o valor de  $F_f$ , faz-se um somatório de momentos em B:

$$P/2 \cos(44.6^\circ) \times 985 = F_f \sin(52.8^\circ) \times 1000$$

$$F_f \cong 7477 \text{ N}$$

A tensão normal na barra "f" é dada por:

$$\sigma_N = \frac{F_f}{A} = \frac{7477}{225} \cong 33.2 \text{ MPa}$$

O factor de segurança é igual a:

$$n = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_N} = \frac{235}{33.2} \cong 7$$

Figura 2.14: Esquema de forças no elemento "f"

Como estas barras estão à compressão, tem de se verificar a carga crítica de instabilidade:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = \frac{\pi^2 \times 210000 \times 18000}{1256^2} \cong 23649 \text{ N}$$

Factor de segurança de instabilidade:  $n_i = \frac{P_{cr}}{F_f} = \frac{23649}{7477} \cong 3.2$

Verifica-se que as barras "f" não instabilizam pois  $F_f \ll P_{cr}$ .

- **Apoio ou 3 (ver figura 2.3):** neste componente é importante verificar a resistência do tubo que o constitui aos esforços ilustrados na figura 2.15.

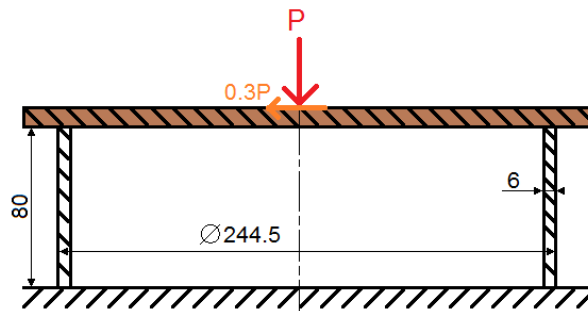


Figura 2.15: Esquema de esforços no apoio

Este tubo está sujeito a um esforço de compressão  $P$  que provoca tensões normais e a um esforço transversal  $0.3 P$  que provoca apenas tensões de corte porque a superfície superior está constringida pela travessa dançante que não permite rotações.

A tensão normal provocada pela força  $P$  iguala a:

$$\sigma_N = \frac{P}{A} = \frac{3805}{4500} = 0.85 \text{ MPa}$$

Apesar de o tubo estar sujeito a tensões muito pequenas, este tem de ser rígido para garantir pequenas deformações e para que as paredes não empenem e não instabilizem, o que justifica a escolha das dimensões acima.

#### 2.2.4.4. Ligações Soldadas

Nesta secção, são verificadas todas as ligações soldadas da estrutura de suporte pelo Eurocódigo 3 parte 1-8. São calculados a espessura e o comprimento dos cordões por forma a evitar tensões residuais e que cumpram sempre que possível os constrangimentos de projecto que a espessura do cordão deve ser maior ou igual que 3 mm e que o comprimento do cordão deve ser maior que 30 mm ou 6 vezes a espessura do cordão.

Segundo o Eurocódigo 3, o valor de cálculo da resistência do cordão de ângulo é suficiente se forem satisfeitas as duas condições seguintes:

$$\left[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)\right]^{0.5} \leq \frac{\sigma_y}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

$$\sigma_{\perp} \leq 0.9 \frac{\sigma_y}{\gamma_{M2}}$$

Como:  $\sigma_y = 235 \text{ MPa}$  (material base S235)

$\beta_w = 0.85$  (tabela 1.5)

$\gamma_{M2} = 1.25$  (NP EN 1993-1-1, pág. 54)

Fica:

$$\left[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)\right]^{0.5} \leq 221.18 \text{ MPa} \quad \text{e} \quad \sigma_{\perp} \leq 169.2 \text{ MPa}$$

Primeiro projectam-se as ligações das cantoneiras “c”, “e” e “f” com os respectivos perfis de cantoneira. Como a espessura das cantoneiras é de 4 mm, então a espessura máxima do cordão é de  $4 \times \sin(45) \cong 2.83 \text{ mm}$  muito próximo dos 3 mm.

Como o perfil cantoneira não é simétrico, tem de se determinar o ponto de aplicação da força para que se possa calcular os comprimentos dos cordões por forma a evitar os momentos parasitas.

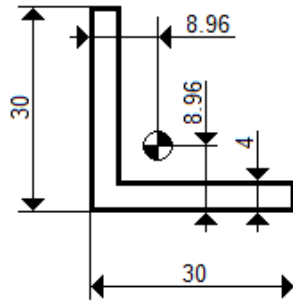
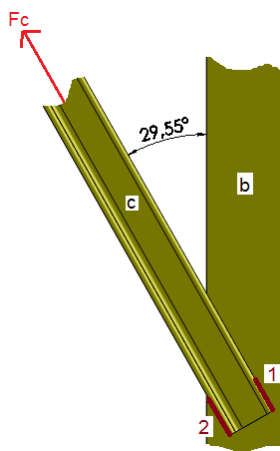


Figura 2.16: Perfil cantoneira com centróide

- **Ligação do componente "c" com "b":**



$$F_c = 2638 \text{ N}$$

$$l_2 \leq 38 \text{ mm}$$

$$a = 2.83 \text{ mm}$$

Cálculo das forças de cada cordão através das equações de equilíbrio para evitar momentos parasitas:

$$\sum M = 0 \Leftrightarrow 30F_1 = 8.96F_c \Leftrightarrow F_1 \cong 788 \text{ N}$$

$$\sum F = 0 \Leftrightarrow F_1 + F_2 = F_c \Leftrightarrow F_2 \cong 1850 \text{ N}$$

Figura 2.17: Detalhe da ligação do componente "c" com "b"

Através da condição de distribuição uniforme de tensões, vem:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \Leftrightarrow \frac{F_1}{a l_1} = \frac{F_2}{a l_2} \Leftrightarrow l_1 = \frac{F_1}{F_2} l_2 = \frac{788}{1850} l_2 \cong 0.43 l_2$$

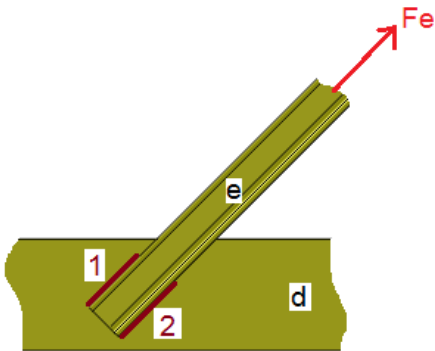
$$\begin{cases} l_2 = 38 \text{ mm} \\ l_1 = 16 \text{ mm} \end{cases} \Leftrightarrow l_{tot} = 38 + 16 = 54 \text{ mm}$$

Neste caso só temos a componente  $\tau_{\parallel}$ :

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_c}{a l_{tot}} = \frac{2638}{2.83 \times 54} = 17.26 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{3 \times \tau_{\parallel}^2} = \sqrt{3 \times 17.26^2} \cong 29.9 \text{ MPa} \ll 221.18 \text{ MPa}$$

• **Ligação do componente "e" com "d":**



$$F_e = 2307 \text{ N}$$

$$l_2 \leq 99 \text{ mm}$$

$$l_1 \leq 69 \text{ mm}$$

$$a = 2.83 \text{ mm}$$

Cálculo das forças de cada cordão através das equações de equilíbrio para evitar momentos parasitas:

$$\sum M = 0 \Leftrightarrow 30F_1 = 8.96F_e \Leftrightarrow F_1 \cong 689 \text{ N}$$

$$\sum F = 0 \Leftrightarrow F_1 + F_2 = F_c \Leftrightarrow F_2 \cong 1618 \text{ N}$$

Figura 2.18: Detalhe da ligação do componente "e" com "d"

Através da condição de distribuição uniforme de tensões, tem-se:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \Leftrightarrow \frac{F_1}{a l_1} = \frac{F_2}{a l_2} \Leftrightarrow l_1 = \frac{F_1}{F_2} l_2 = \frac{689}{1618} l_2 \cong 0.43 l_2$$

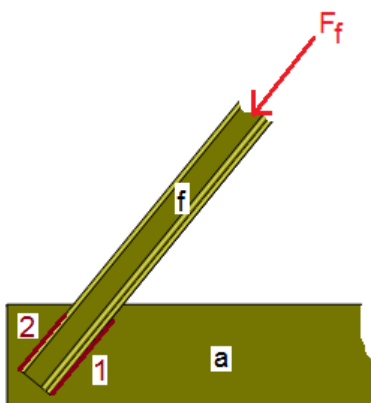
$$\begin{cases} l_2 = 70 \text{ mm} \\ l_1 = 30 \text{ mm} \end{cases} \Leftrightarrow l_{tot} = 30 + 70 = 100 \text{ mm}$$

Neste caso só temos a componente  $\tau_{\parallel}$ :

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_c}{a l_{tot}} = \frac{2307}{2.83 \times 100} = 8.15 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{3 \times \tau_{\parallel}^2} = \sqrt{3 \times 8.15^2} \cong 14.12 \text{ MPa} \ll 221.18 \text{ MPa}$$

• **Ligação do componente "f" com "a":**



$$F_f = 7477 \text{ N}$$

$$l_2 \leq 80 \text{ mm}$$

$$l_1 \leq 110 \text{ mm}$$

$$a = 2.83 \text{ mm}$$

Cálculo das forças de cada cordão através das equações de equilíbrio para evitar momentos parasitas:

$$\sum M = 0 \Leftrightarrow 30F_1 = 8.96F_f \Leftrightarrow F_1 \cong 2233 \text{ N}$$

$$\sum F = 0 \Leftrightarrow F_1 + F_2 = F_c \Leftrightarrow F_2 \cong 5244 \text{ N}$$

Figura 2.19: Detalhe da ligação do componente "f" com "a"

Através da condição de distribuição uniforme de tensões, tem-se:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \Leftrightarrow \frac{F_1}{a l_1} = \frac{F_2}{a l_2} \Leftrightarrow l_1 = \frac{F_1}{F_2} l_2 = \frac{2233}{5244} l_2 \cong 0.43 l_2$$

$$\begin{cases} l_2 = 30 \text{ mm} \\ l_1 = 70 \text{ mm} \end{cases} \Leftrightarrow l_{tot} = 30 + 70 = 100 \text{ mm}$$

Neste caso só temos a componente  $\tau_{\parallel}$ :

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_c}{a l_{tot}} = \frac{7477}{2.83 \times 100} = 26.42 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{3} \times \tau_{\parallel}^2 = \sqrt{3} \times 26.42^2 \cong 45.76 \text{ MPa} \ll 221.18 \text{ MPa}$$

- **Ligação do componente "e" com "b":**

O componente "e" é ligado ao componente "b" através de 3 cordões de soldadura como mostra a figura.... O comprimento dos 3 cordões é calculado por forma a eliminar os momentos parasitas.

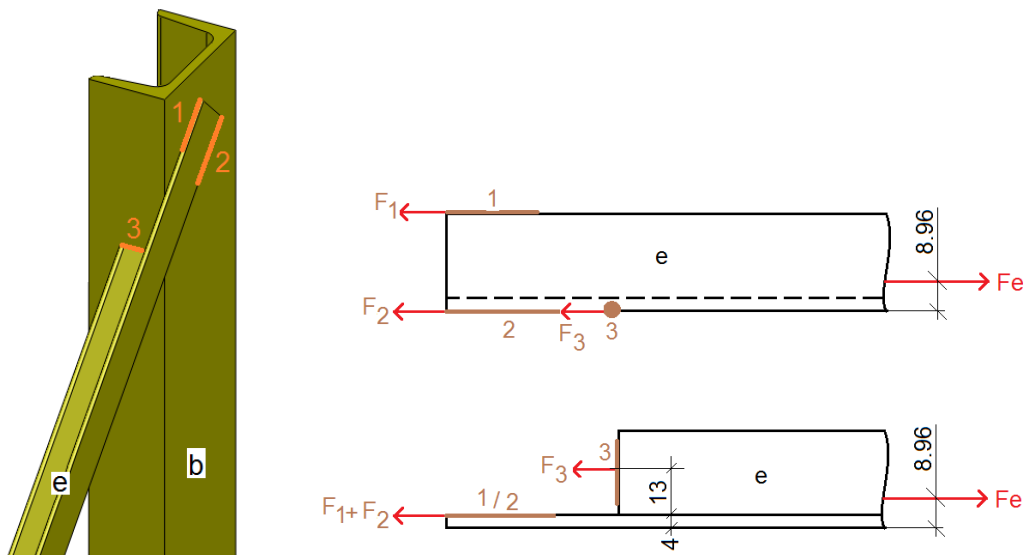


Figura 2.20: Detalhe da ligação do componente "e" com "b"

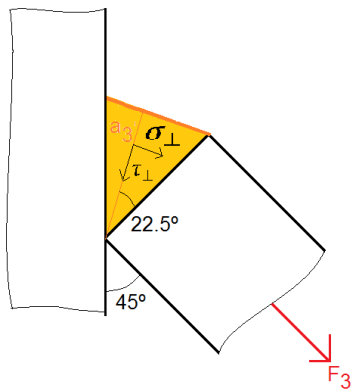
Os valores das forças  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$  são obtidos através das equações de equilíbrio estático:

$$F_e = 2307 \text{ N}$$

$$\begin{cases} \sum F = 0 \Leftrightarrow F_1 + F_2 + F_3 = F_e \\ \sum M_V = 30 F_1 = 8.96 F_e \\ \sum M_H = 4(F_1 + F_2) + 17 F_3 = 8.96 F_e \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} F_1 = 689 \text{ N} \\ F_2 = 738 \text{ N} \\ F_3 = 880 \text{ N} \end{cases}$$

Neste caso o cordão limitativo é o cordão 3.

As tensões que actuam no cordão 3,  $\sigma_{\perp}$  e  $\tau_{\perp}$ , estão representadas na figura 2.20.



$$a_3 = 4 \times \cos(22.5^\circ) \cong 3.7 \text{ mm}$$

$$l_3 = 26 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_3 \cos(22.5^\circ)}{l_3 \times a_3} = \frac{880 \cos(22.5^\circ)}{26 \times 3.7} = 8.45 \text{ MPa} \ll 169.2 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\perp} = \frac{F_3 \sin(22.5^\circ)}{l_3 \times a_3} = \frac{880 \times \sin(22.5^\circ)}{26 \times 3.7} = 3.5 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3\tau_{\perp}^2} = \sqrt{8.45^2 + 3 \times 3.5^2} \cong 10.4 \text{ MPa} \ll 221.18 \text{ MPa}$$

Figura 2.21: Detalhe do cordão 3

Os cordões 1 e 2 apenas têm a componente  $\tau_{\parallel}$ . Através da condição da distribuição uniforme de tensões, calcula-se  $l_1$  e  $l_2$ :

$$a_1 = a_2 = 4 \times \cos(45^\circ) = 2.83 \text{ mm}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_1}{a l_1} \Rightarrow \sqrt{3 \left( \frac{F_1}{a l_1} \right)^2} = 10.4 \text{ MPa} \Rightarrow l_1 \cong 41 \text{ mm}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_2}{a l_2} \Rightarrow \sqrt{3 \left( \frac{F_2}{a l_2} \right)^2} = 10.4 \text{ MPa} \Rightarrow l_2 \cong 43 \text{ mm}$$

- **Ligação do componente "f" com "b":**

O componente "e" é ligado ao componente "b" através de 3 cordões de soldadura como mostra a figura 2.21. O comprimento dos 3 cordões é calculado por forma a eliminar os momentos parasitas.

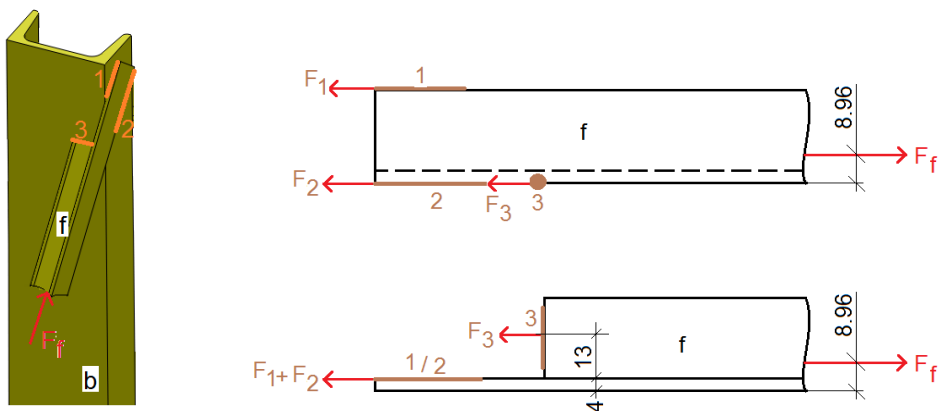


Figura 2.22: Detalhe da ligação do componente "f" com "b"

Os valores das forças  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$  são obtidos através das equações de equilíbrio estático:

$$F_f = 7477 \text{ N}$$

$$\begin{cases} \sum F = 0 \Leftrightarrow F_1 + F_2 + F_3 = F_f \\ \sum M_V = 30 F_1 = 8.96 F_f \\ \sum M_H = 4(F_1 + F_2) + 17 F_3 = 8.96 F_f \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} F_1 = 2233 \text{ N} \\ F_2 = 2391 \text{ N} \\ F_3 = 2853 \text{ N} \end{cases}$$

Neste caso o cordão limitativo é o cordão 1.

Os cordões 1 e 2 apenas têm a componente  $\tau_{\parallel}$ .

$$a_1 = a_2 = 4 \times \cos(45^\circ) = 2.83 \text{ mm}$$

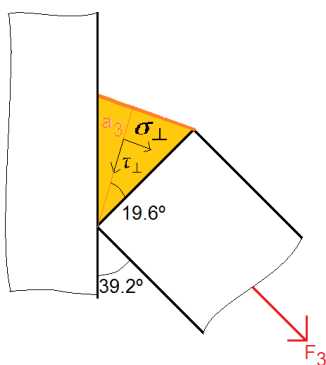
$$l_1 = 33 \text{ mm}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_1}{a l_1} \Rightarrow \sqrt{3 \left( \frac{F_1}{a l_1} \right)^2} = \sqrt{3 \left( \frac{2233}{2.83 \times 33} \right)^2} = 41.4 \text{ MPa} \ll 221.18 \text{ MPa}$$

Através da condição da distribuição uniforme de tensões, calculamos  $l_2$  e  $l_3$ :

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_2}{a l_2} \Rightarrow \sqrt{3 \left( \frac{F_2}{a l_2} \right)^2} = 41.4 \text{ MPa} \Rightarrow l_2 \cong 35 \text{ mm}$$

As tensões que actuam no cordão 3,  $\sigma_{\perp}$  e  $\tau_{\perp}$ , estão representadas na figura 2.22.



$$a_3 = 4 \times \cos(19.6^\circ) \cong 3.8 \text{ mm}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3\tau_{\perp}^2} = \sqrt{\left( \frac{F_3 \cos(19.6^\circ)}{l_3 \times a_3} \right)^2 + 3 \times \left( \frac{F_3 \sin(19.6^\circ)}{l_3 \times a_3} \right)^2} = 41.4 \text{ MPa}$$

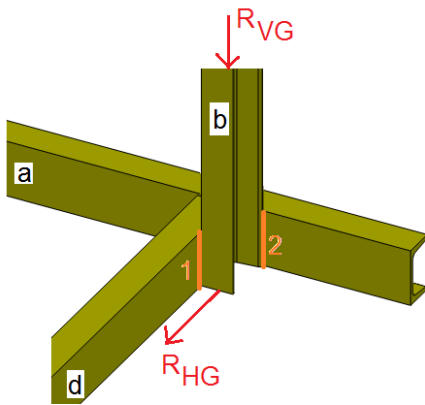
$$\Rightarrow l_3 = 19 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_3 \cos(19.6^\circ)}{l_3 \times a_3} = \frac{2853 \cos(19.6^\circ)}{19 \times 3.8} = 37.2 \text{ MPa} \ll 169.2 \text{ MPa}$$

Figura 2.23: Detalhe do cordão 3

- **Ligação do componente "b" aos componentes "a" e "d":**

Nesta ligação tem-se em conta as reacções calculadas anteriormente na verificação da resistência do componente b no ponto G.



$$R_{VG} = 5436 \text{ N}$$

$$R_{HG} = 488.5 \text{ N}$$

Pelo Eurocódigo 3, considera-se  $a_1 = a_2 = a = 3 \text{ mm}$

$$l_1 = l_2 = 80 \text{ mm}$$

$$l_{tot} = 160 \text{ mm}$$

Figura 2.24: Detalhe da ligação do componente "b" aos componentes "a" e "d"

A força  $R_{VG}$  provoca tensões segundo a componente  $\tau_{\parallel}$  e a força  $R_{HG}$  provoca tensões segundo as componentes  $\sigma_{\perp}$  e  $\tau_{\perp}$ .

$$\tau_{\parallel} = \frac{R_{VG}}{a l_{tot}} = \frac{5436}{3 \times 160} \cong 11.3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{R_{HG} \cos(45^\circ)}{a l_{tot}} = \frac{488.5 \cos(45^\circ)}{3 \times 160} \cong 0.72 \text{ MPa} \ll 169.2 \text{ MPa}$$

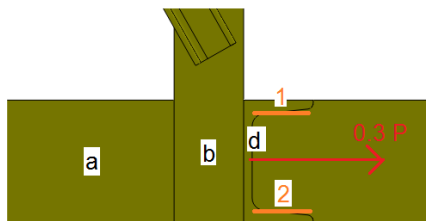
$$\tau_{\perp} = \frac{R_{HG} \sin(45^\circ)}{a l_{tot}} = \frac{488.5 \times \sin(45^\circ)}{3 \times 160} \cong 0.72 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp} + \tau_{\parallel})^2} = \sqrt{0.72^2 + 3 \times (11.3 + 0.72)^2} \cong 20.8 \ll 221.18 \text{ MPa}$$

- **Ligação do componente "a" com "d":**

Nesta ligação, consideram-se dois casos de carregamento distintos. Um caso em que a ligação tem de suportar a força transversal  $0.3P$  e outro caso em que a ligação tem de suportar a reacção  $R_{GH}$  calculada na verificação da resistência do componente "d".

- Caso 1:



Pelo Eurocódigo 3, considera-se  $a_1 = a_2 = a = 3 \text{ mm}$

$$l_1 = l_2 = 39 \text{ mm}$$

$$l_{tot} = 78 \text{ mm}$$

$$0.3P = 1141.5 \text{ N}$$

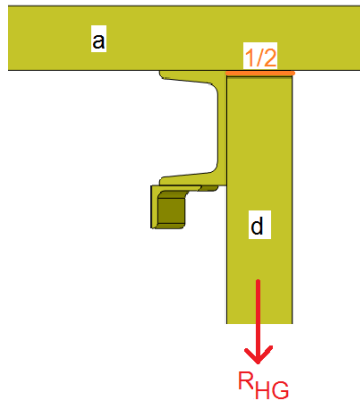
Figura 2.25: Detalhe da ligação do componente "a" com "d" (caso 1)



Neste caso apenas existe a componente  $\tau_{\parallel}$ :

$$\tau_{\parallel} = \frac{0.3P}{a l_{tot}} = \frac{1141.5}{3 \times 78} \cong 4.9 \text{ MPa} \Rightarrow \sqrt{3\tau_{\parallel}^2} \cong 8.5 \text{ MPa} \ll 221.18 \text{ MPa}$$

- Caso 2:



Pelo Eurocódigo 3, considera-se  $a_1 = a_2 = a = 3 \text{ mm}$

$$l_1 = l_2 = 39 \text{ mm}$$

$$l_{tot} = 78 \text{ mm}$$

$$R_{GH} = 1631 \text{ N}$$

Figura 2.26: Detalhe da ligação do componente "a" com "d" (caso 2)

Neste caso os cordões estão sujeitos às componentes  $\sigma_{\perp}$  e  $\tau_{\perp}$ :

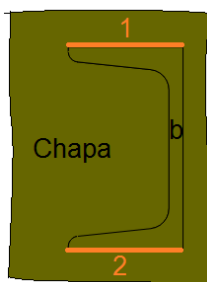
$$\sigma_{\perp} = \frac{R_{HG} \cos(45^{\circ})}{a l_{tot}} = \frac{1631 \cos(45^{\circ})}{3 \times 78} \cong 4.93 \text{ MPa} \ll 169.2 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\perp} = \frac{R_{HG} \sin(22.5^{\circ})}{a l_{tot}} = \frac{1631 \times \sin(45^{\circ})}{3 \times 78} \cong 4.93 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp})^2} = \sqrt{4.93^2 + 3 \times (4.93)^2} \cong 9.86 \ll 221.18 \text{ MPa}$$

- **Ligação da chapa de fixar os apoios ao componente "b":**

Esta ligação está sujeita a dois casos de carregamento. Um caso em que existe uma força P vertical e uma força 0.3P longitudinal a actuarem na placa que provocam tensões nos cordões 1 e 2 segundo as componentes  $\sigma_{\perp}$  e  $\tau_{\perp}$ . No outro caso, há a mesma força vertical P mas agora a força 0.3P é transversal e provoca tensões segundo  $\tau_{\parallel}$ .



$$a_1 = a_2 = a = 3 \text{ mm}$$

$$l_1 = l_2 = 45 \text{ mm}$$

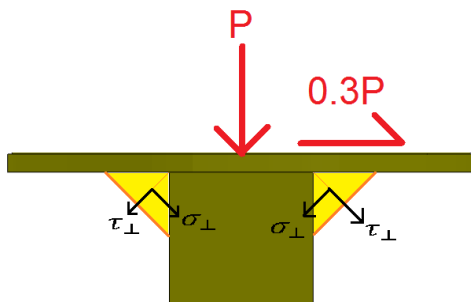
$$l_{tot} = 90 \text{ mm}$$

$$P = 3805 \text{ N}$$

$$0.3P = 1141.5$$

Figura 2.27: Detalhe da ligação das chapas de fixar os apoios aos componente "b"

- Caso 1:



Pior caso:

$$\sigma_{\perp} = \frac{P/2 \cos(45^{\circ}) - 0.3 P/2 \cos(45^{\circ})}{a l_1} \cong 6.98 \text{ MPa} \ll 169.2 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\perp} = \frac{P/2 \cos(45^{\circ}) + 0.3 P/2 \cos(45^{\circ})}{a l_1} \cong 12.96 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp})^2} \cong 23.5 \text{ MPa} \ll 221.18 \text{ MPa}$$

Figura 2.28: Tensões na ligação

- Caso 2:

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{P \cos(45^{\circ})}{a l_{tot}} \cong 9.96 \text{ MPa} \ll 169.2 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{0.3P}{a l_{tot}} \cong 4.22 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp} + \tau_{\parallel})^2} \cong 26.5 \ll 221.18 \text{ MPa}$$

- **Soldadura no Apoio:**

No fabrico do apoio são feitos cordões interrompidos conforme ilustra a figura 2.29.

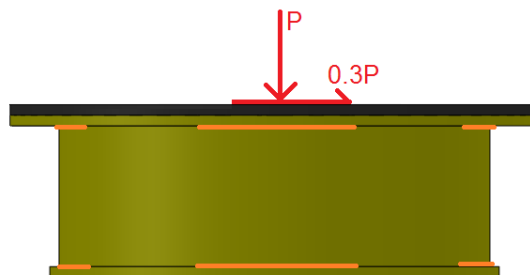


Figura 2.29: Soldadura descontínua no apoio

Segundo o Eurocódigo 3 parte 1-8, numa soldadura de ângulo descontínua, os afastamentos entre as extremidades de cada cordão,  $L_1$ , e o comprimento de cada cordão,  $L_W$ , deverão satisfazer as seguintes condições:

- $L_W \geq$  menor dos valores  $(0.75 b, 0.75 b_1)$
- $L_1 \leq$  menor dos valores  $(16 t, 16 t_1, 200 \text{ mm})$

Daqui resulta que:  $L_W \geq 0.75 \times 80 = 60 \text{ mm}$

$$L_1 \leq 16 \times 6 = 96 \text{ mm}$$

Como o comprimento total de soldadura é de  $\pi \times 244.5 \cong 768 \text{ mm}$ , dividindo por 8, obtemos 96 mm. Assim pode-se afirmar que  $L_W = L_1 = 96 \text{ mm}$  resultando em 4 cordões.

Para verificar a resistência dos cordões, consideram-se apenas 2 cordões opostos para simplificar a análise.

Também aqui há dois casos diferentes. A força  $P$  provoca tensões segundo as componentes  $\sigma_{\perp}$  e  $\tau_{\perp}$  enquanto que a força  $0.3P$  ou provoca tensões segundo a componente  $\tau_{\parallel}$  ou segundo as componentes  $\sigma_{\perp}$  e  $\tau_{\perp}$ .

$$a = 3 \text{ mm}$$

- Caso 1:

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{P \cos(45^{\circ})}{a 2L_W} \cong 4.67 \text{ MPa} \ll 169.2 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{0.3P}{a 2L_W} \cong 1.98 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp} + \tau_{\parallel})^2} \cong 12.42 \ll 221.18 \text{ MPa}$$

- Caso 2:

Pior caso:

$$\sigma_{\perp} = \frac{P/2 \cos(45^{\circ}) - 0.3 P/2 \cos(45^{\circ})}{a l_W} \cong 3.27 \text{ MPa} \ll 169.2 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\perp} = \frac{P/2 \cos(45^{\circ}) + 0.3 P/2 \cos(45^{\circ})}{a l_W} \cong 6.07 \text{ MPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp})^2} \cong 11.01 \text{ MPa} \ll 221.18 \text{ MPa}$$

Apenas 2 cordões garantem segurança no apoio.

## 2.2.4.5. Ligações com Parafusos

Na estrutura de suporte há 4 ligações com parafusos iguais para ligar os 4 apoios à estrutura.

Na figura 2.30 está ilustrada a furação feita no apoio para esta ligação.

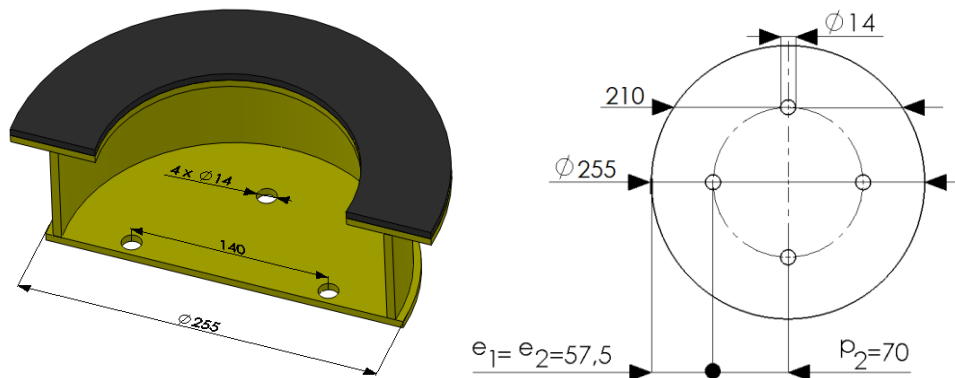


Figura 2.30: Esquema da furação da ligação por parafusos

A verificação da resistência da ligação é feita através do método apresentado no Eurocódigo 3 parte 1-8, como está escrito na secção “1.4.2.1.2. Cálculo da resistência individual dos parafusos”, Esta ligação é da categoria C: Resistente ao escorregamento no estado limite último, em que se tem de verificar as seguintes condições:

$$F_{V,b} \leq F_{R,esm} - \text{verificar resistência ao esmagamento};$$

$$F_{V,b} \leq F_{R,esc} - \text{verificar resistência ao escorregamento};$$

$$F_V \leq N_R - \text{verificar resistência da secção útil que intercepta os furos dos parafusos.}$$

Esta ligação é feita usando 4 parafusos M12 da classe 8.8 com  $\sigma_{yb} = 640 \text{ MPa}$  e  $\sigma_{ub} = 800 \text{ MPa}$ .

$$F_V = 0.3P = 0.3 \times 3805 = 1141.5 \text{ N}$$

$$F_{V,b} = \frac{F_V}{4} = \frac{1141.5}{4} \cong 285.4 \text{ N}$$

• **Resistência ao esmagamento:**

$$F_{R,esm} = \frac{k_1 \alpha_b \sigma_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2.5 \times 1 \times 360 \times 12 \times 6}{1.25} = 51840 \text{ N} \gg 285.4 \text{ N}$$

-  $\alpha_b$  é o menor dos valores:

- 1.0
- $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} = \frac{57.5}{3 \times 14} = 1.37$
- $\frac{\sigma_{ub}}{\sigma_u} = \frac{800}{360} = 2.22$

-  $k_1$  é o menor dos valores:

- 2.5
- $2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7 = 2.8 \frac{57.5}{14} - 1.7 = 9.8$
- $1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7 = 1.4 \frac{70}{14} - 1.7 = 5.3$

• **Resistência ao escorregamento:**

$$F_{R,esc} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,c} = \frac{1 \times 1 \times 0.3}{1.25} \times 42728 = 10254.72 \text{ N} \gg 285.4 \text{ N}$$

-  $k_s = 1$  (tabela 1.3)

-  $n = 1$

-  $\mu = 0.3$  (tabela 1.4)

-  $F_{p,c} = 0.7 \sigma_{ub} A_s = 0.7 \times 800 \times 76.3 = 42728 \text{ N}$

- Parafuso M12  $\Rightarrow A_s = 76.3 \text{ mm}^2$

- Resistência da secção útil que intercepta os furos dos parafusos:

$$N_R = \frac{A_u \sigma_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1176 \times 235}{1.0} = 276360 \text{ N} \gg 1141.5 \text{ N}$$

- $A_u$  é o menor dos valores:
  - $(255 - 2 \times 14) \times 6 = 1362 \text{ mm}^2$
  - $(210 - 14) \times 6 = 1176 \text{ mm}^2$

## 2.2.5. Análise estrutural pelo Método dos Elementos Finitos

### 2.2.5.1. Método de Elementos Finitos

No âmbito da engenharia de estruturas, o Método dos Elementos Finitos permite a determinação de estados de tensão e de deformação de estruturas de geometria complexa sujeitos a acções exteriores onde a utilização dos métodos analíticos é moroso ou mesmo impossível.

Neste projecto recorreu-se ao *software* de elementos finitos ANSYS®.

### 2.2.5.2. Modelo de Elementos de Viga Timoshenko

O elemento finito usado na análise estrutural é o Beam188. Este elemento tem por base a teoria de vigas de Timoshenko, tem 6 graus de liberdade em cada nó (rotação e translação segundo os eixos x,y e z) e inclui os efeitos do esforço de corte.

O Beam188 permite uma análise muito completa visto ser um elemento 3-D em que permite a criação de diferentes secções predefinidas pelo programa onde o cálculo dos momentos de inércia e de torção são realizados automaticamente.

Nas figuras 2.30, 2.31 e 2.32 estão representadas as secções utilizadas na análise (UPN 80, L30x30x4 e a chapa de fixar os apoios com 10 mm de espessura). É necessário referir que o ANSYS® não permite a realização de raios de concordância utilizados nas secções em “U” e cantoneiras, como tal os momentos de inércia calculados pelo ANSYS® tem uma pequena diferença, comparando com os valores dos perfis normalizados como se pode ver nas figuras 2.31, 2.32 e 2.33.

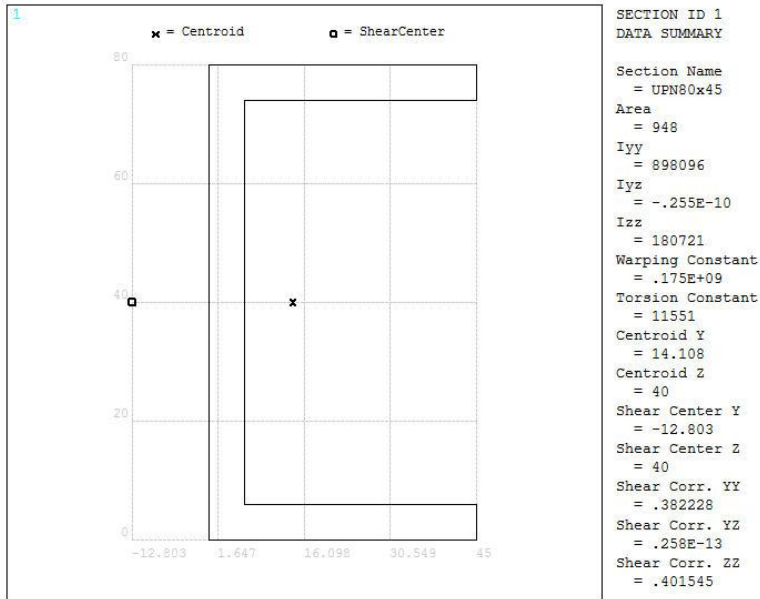


Figura 2.31: Perfil "UPN 80" gerado pelo ANSYS

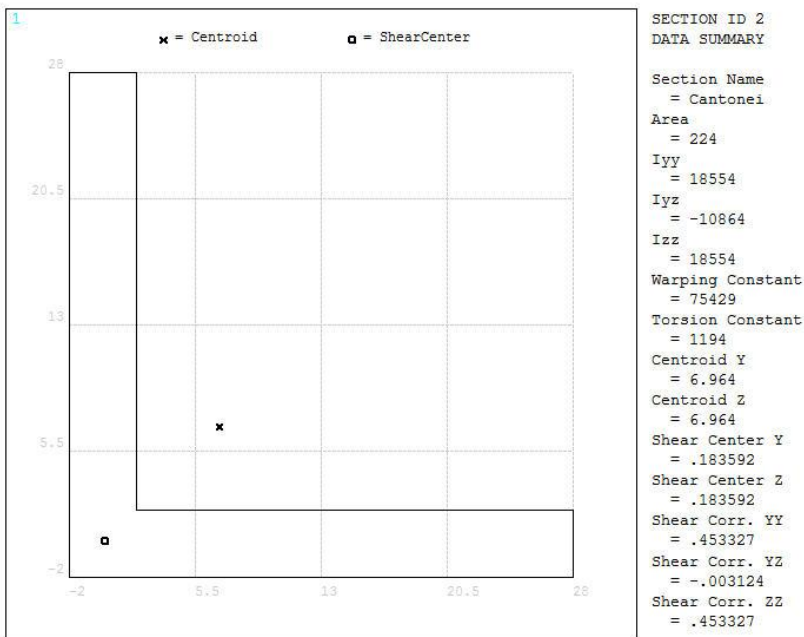


Figura 2.32: Perfil "L 30x30x4" gerado pelo ANSYS

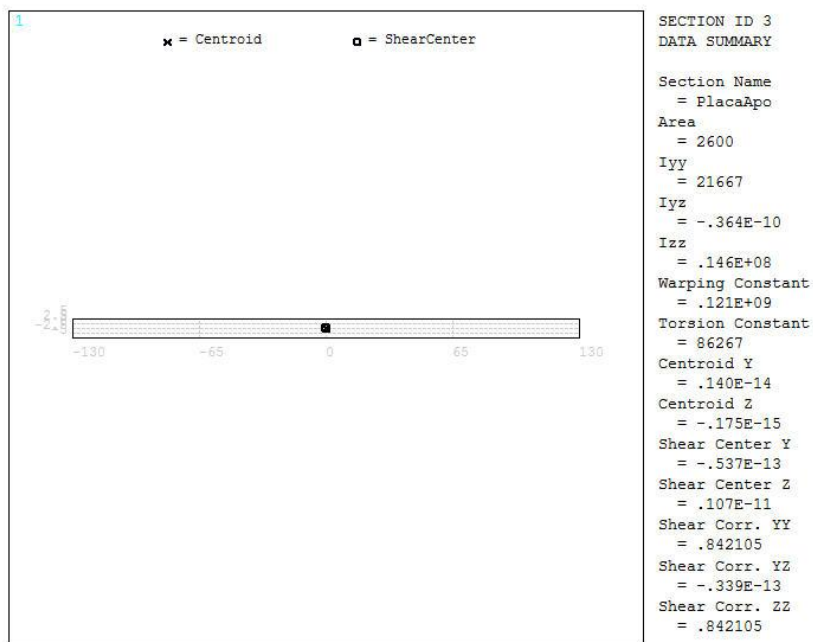


Figura 2.33: Perfil da placa dos apoios gerado pelo ANSYS

### 2.2.5.3. Condições de Fronteira e Carregamentos Utilizados

As forças utilizadas para a realização da análise estrutural são as mesmas forças consideradas no Eurocódigo 3, Um caso em que se tem a força vertical  $P=3805$  N e a força horizontal  $0.3P=1141.5$  N transversal e outro caso em que se tem a força vertical  $P=3805$  N e a força horizontal  $0.3P=1141.5$  N longitudinal.

Como a plataforma está assente no chão, considera-se como a aproximação mais severa o deslocamento vertical e horizontal dos 8 pontos que estão nos extremos da base da estrutura.

Na Figura 2.34 estão apresentados os constrangimentos aplicados e o ponto de aplicação das forças pelas setas a vermelho.

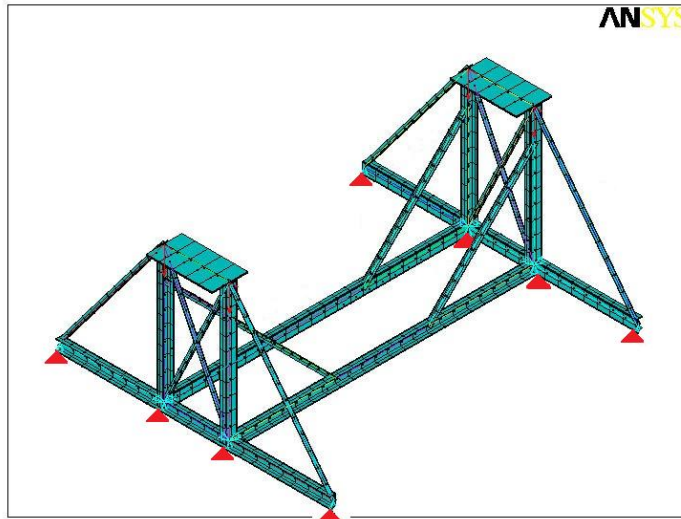


Figura 2.34: Estrutura em elementos finitos com forças e constrangimentos aplicados

Considera-se que cada elemento finito tem um comprimento de 100 mm para obter um resultado mais detalhado dos estados de tensões e dos campos de deslocamentos.

#### 2.2.5.4. Campo de Tensões

Os campos de tensões obtidos para os dois casos de carga ( $P$  vertical +  $0.3P$  longitudinal e  $P$  vertical +  $0.3P$  transversal), estão representados nas figuras 2.35 e 2.36.

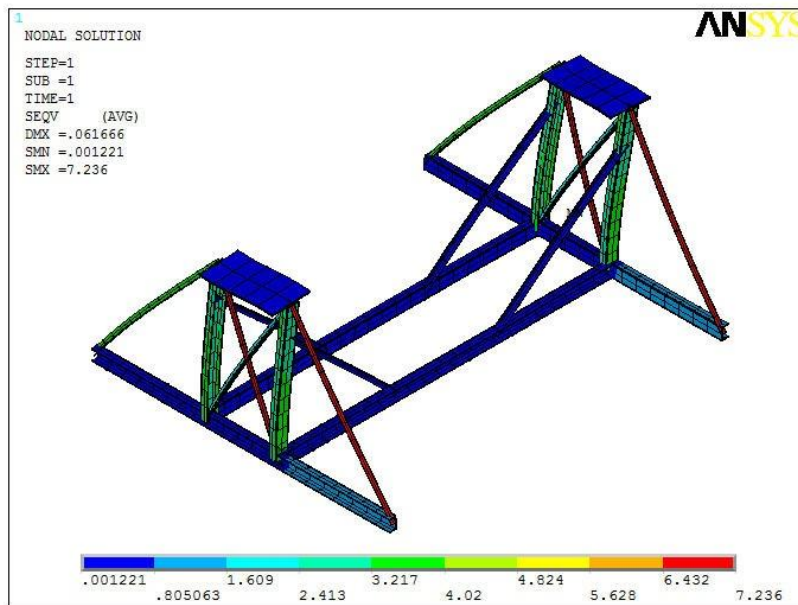


Figura 2.35: Distribuição de tensões com a força  $0.3P$  transversal



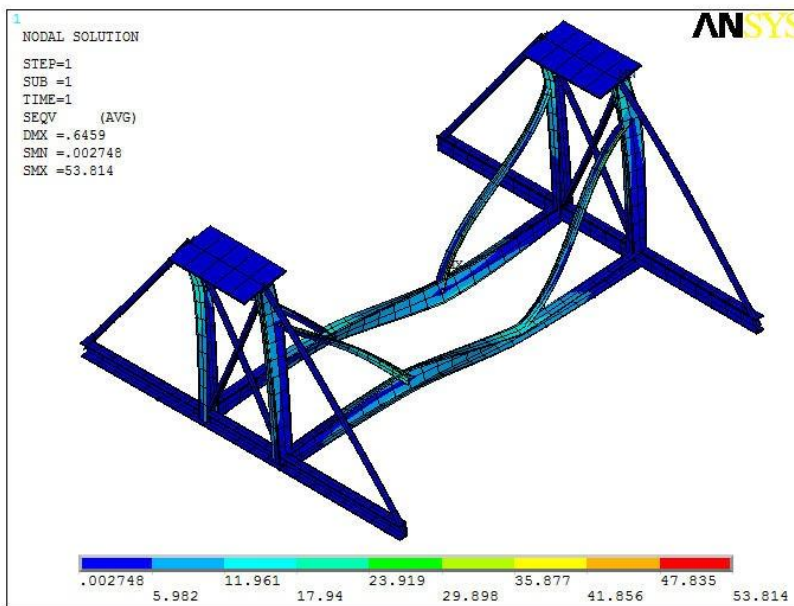


Figura 2.36: Distribuição de tensões com a força 0.3P longitudinal

Da análise das figuras 2.35 e 2.36, podem-se tirar algumas conclusões. Verifica-se que foi uma boa aproximação considerar que as cantoneiras eram barras na análise estrutural pelo método analítico uma vez que nos resultados obtidos pelo M.E.F. as cantoneiras apresentam um campo de tensões uniforme. Também se verifica que todas as tensões obtidas pelo M.E.F. são iguais ou inferiores às obtidas pelo método analítico, o que mostra uma coerência dos resultados.

### 2.2.5.5. Campo de Deslocamentos

Os campos de deslocamentos obtidos em ambos os casos de carga, estão representados nas figuras 2.37 e 2.38.

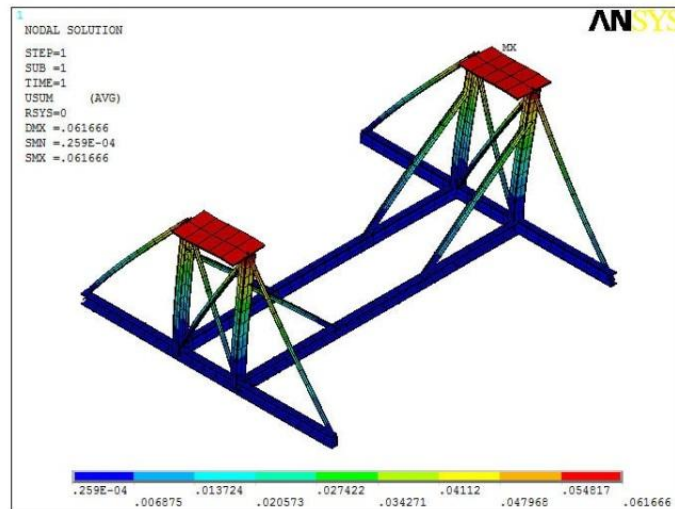


Figura 2.37: Campo de deslocamentos com a força 0.3P Transversal

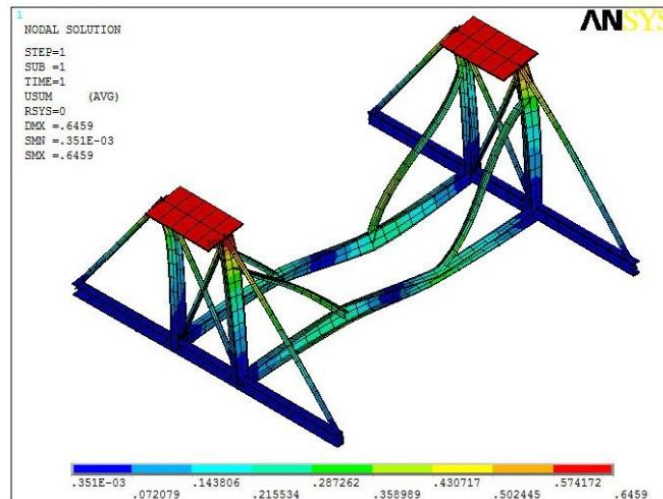


Figura 2.38: Campo de deslocamentos com a força 0.3P longitudinal

Nestes resultados pode-se observar que os deslocamentos máximos ocorrem nas superfícies dos apoios, como era de esperar, e que estes têm valores muito pequenos, 0.062 mm no caso em que a força 0.3P actua transversalmente e 0.65 mm quando a força 0.3P actua longitudinalmente, respectivamente.

$$\frac{U_{\text{máx}}}{L} = \frac{0.65}{1000} = 6.5 \times 10^{-4} \Rightarrow 0.065 \%$$

## 2.2.5.6. Evitar a Queda Lateral

Da análise feita pelos elementos finitos a simular a situação limite antes da queda lateral da estrutura, quando esta está inclinada 45° com a horizontal, obtém-se o campo de tensões apresentado na figura 2.39.

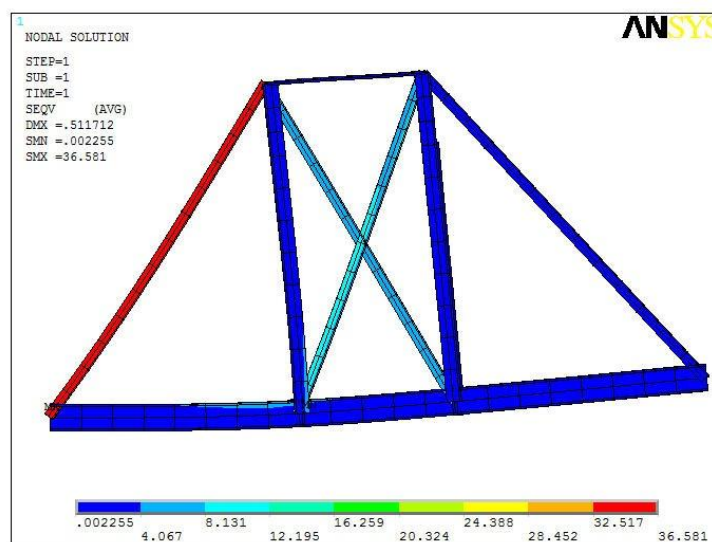


Figura 2.39: Distribuição de tensões com a estrutura inclinada 45°

Obtém-se uma tensão máxima no componente “T” de 36 MPa, valor muito próximo dos 33 MPa obtidos pelo método do Eurocódigo 3.

## 2.3. Consola móvel

Para além da estrutura de suporte, foi concebida uma mesa móvel com um circuito hidráulico e um circuito electrónico controlados por um computador portátil ou por um conjunto de botões (modo manual).

### 2.3.1. Circuito Hidráulico

Após se analisarem os requisitos e os constrangimentos de projecto chega-se ao circuito hidráulico que está representado na figura 2.40.

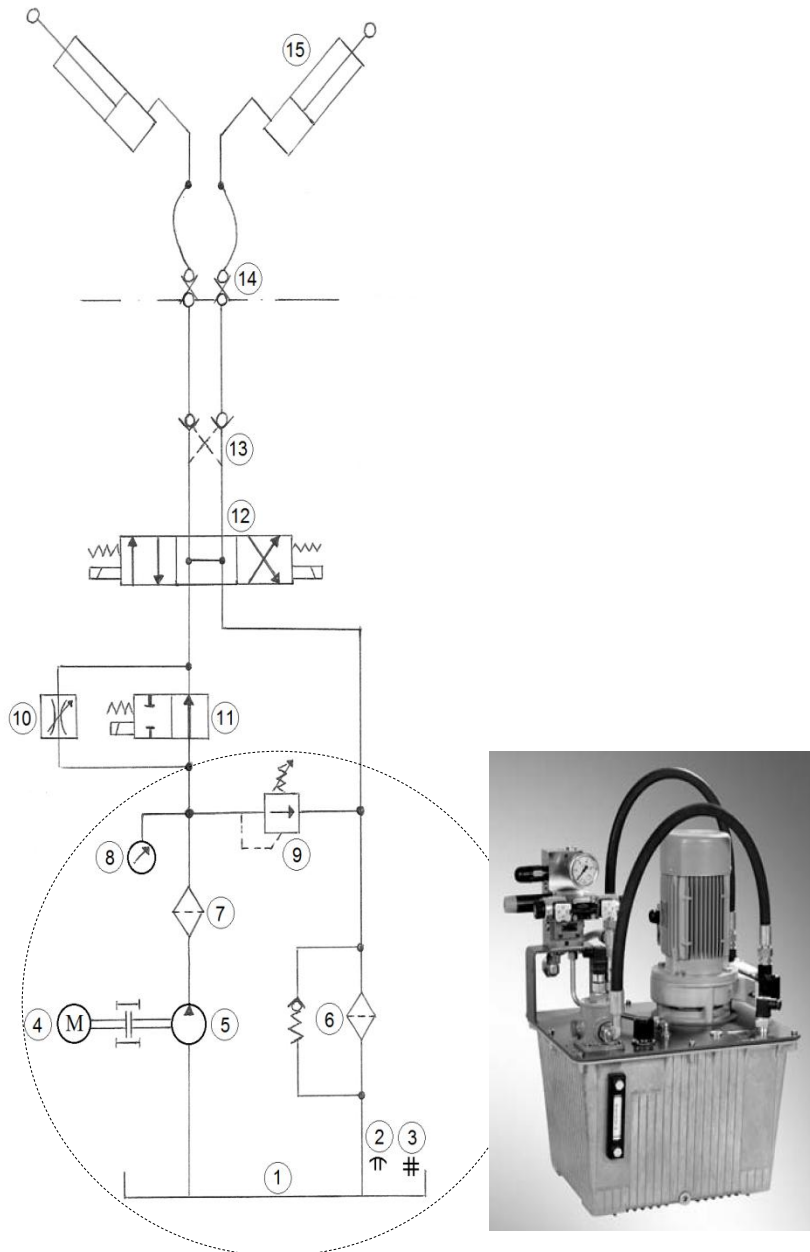


Figura 2.40: Circuito hidráulico

Este circuito consiste num grupo de potência e num conjunto de válvulas de comando eléctrico.

O grupo de potência possui um reservatório de 40 litros ao qual é acoplado um motor eléctrico (4) e uma bomba hidráulica (5), à saída da bomba é colocado um filtro de pressão (7) para garantir a qualidade do óleo que vai circular nas válvulas e no circuito hidráulico do bogie por forma a evitar a contaminação do circuito do bogie e posteriormente do comboio. Ainda no grupo de potência é colocado um manómetro de pressão (8), uma válvula reguladora de pressão e segurança (9) e um filtro de retorno para filtrar todo o óleo que retorna ao reservatório.

O conjunto de válvulas, possui uma válvula direccional (12) para inclinar a travessa de carga para um lado ou para o outro, tem uma válvula reguladora de caudal (10) e uma válvula de solenóide (11) em paralelo para controlar a velocidade de inclinação (com a válvula de solenóide em posição normal aberta o óleo passa livremente provocando um avanço rápido, com a válvula solenóide actuada, fechada, o óleo tem de passar pela válvula reguladora de caudal provocando um avanço lento) e tem ainda uma válvula de retenção pilotada (13) para garantir a estanquicidade do circuito e o posicionamento dos cilindros uma vez que a válvula direccional mesmo fechada não garante.

Para saber qual a potência do motor eléctrico e a cilindrada da bomba hidráulica que são necessários para fazer inclinar a travessa de carga, estima-se a força que o cilindro hidráulico necessita de fazer, para depois calcular a pressão de serviço e a potência do motor.

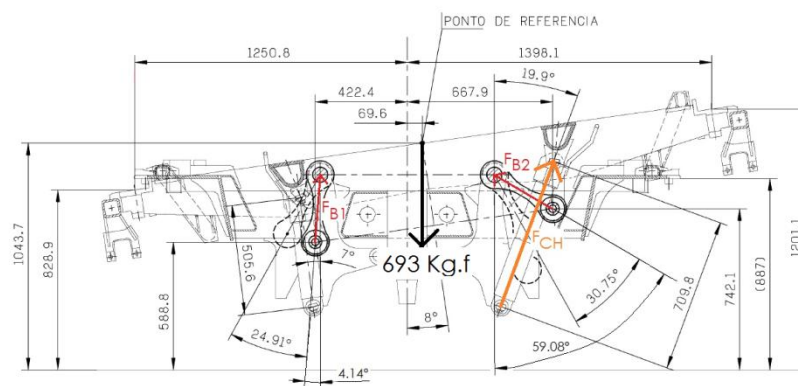


Figura 2.41: Forças actuantes na travessa de carga

A força do cilindro é máxima quando a travessa de carga está inclinada 8°. A travessa está apenas apoiada nas duas bielas e no cilindro.

Através das equações de equilíbrio estático, estima-se a força do cilindro  $F_{CH}$ :

$$\begin{cases} \sum F_V = 0 \\ \sum F_H = 0 \\ \sum M = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} F_{B1} \cos(4.14^\circ) + F_{B2} \cos(59.08^\circ) + F_{CH} \cos(19.9^\circ) - 693 = 0 \\ F_{B1} \sin(4.14^\circ) - F_{B2} \sin(59.08^\circ) + F_{CH} \sin(19.9^\circ) = 0 \\ F_{B2} \cos(59.08^\circ) \times 1090.3 + F_{CH} \cos(19.9^\circ) \times 1090.3 - 693 \times 492 = 0 \end{cases}$$

Resolvendo o sistema de equações resulta:

$$\begin{cases} F_{B1} \cong 381 \text{ Kg.f} \\ F_{B2} \cong 135 \text{ Kg.f} \\ F_{CH} \cong 259 \text{ Kg.f} \end{cases}$$

Como o êmbolo do cilindro tem 70 mm de diâmetro, a sua área vale  $\pi \times \frac{7^2}{4} = 38.5 \text{ cm}^2$ .

A pressão necessária é então:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{259}{38.5} = 6.7 \text{ bar}$$

Para calcular o caudal necessita-se do volume de óleo necessário para distender o êmbolo e do tempo pretendido para inclinar a travessa. O curso do êmbolo para inclinar a travessa de carga 8° é de 14 cm e pretende-se que demore 5 s a distender os 14 cm.

O volume de óleo necessário para distender os cilindros hidráulicos será de:

$$V = A \cdot S = 38.5 \times 14 = 539 \text{ cm}^3 \cong 0.54 \text{ dm}^3$$

$$t = 5 \text{ s}$$

$$Q = \frac{V}{t} \times 60 = \frac{0.54}{5} \times 60 \cong 6.48 \text{ L/min}$$

Com estes resultados já se pode calcular a potência do motor necessária:

$$P = \frac{p \cdot Q}{600} = \frac{6.7 \times 6.48}{600} \cong 0.072 \text{ kW}$$

Assumindo um rendimento volumétrico de 95% e como a rotação de um motor eléctrico é de 1500 rpm, a cilindrada da bomba será de:

$$V_u = \frac{Q}{n \eta_v} = \frac{6.48}{1500 \times 0.95} \cong 0.0045 \text{ dm}^3 = 4.5 \text{ cm}^3$$

Consultado um catálogo de um fornecedor de componentes hidráulicos (CUDELL®), verifica-se que a bomba com a cilindrada mais próxima é de 4.19 cm<sup>3</sup> com um caudal de 6.45 L/min e o motor eléctrico de menor potência é de 0.5kW.

Assim refazendo os cálculos com um motor com 0.5 kW de potência e com uma bomba com 4.19 cm<sup>3</sup> de cilindrada e 6.45 L/min de caudal fica:

$$p = \frac{600 P}{Q} = \frac{600 \times 0.5}{6.45} \cong 46.5 \text{ bar}$$

$$F = p \cdot A = 46.5 \times 38.5 = 1790.25 \text{ Kg.f}$$

$$t = \frac{V}{Q} \times 60 = \frac{0.54}{6.45} \times 60 \cong 5 \text{ s}$$

Como resultado final, obtém-se um grupo de potência sobredimensionado com um motor de 500 W e uma bomba de 4.19 cm<sup>3</sup>, que atinge uma pressão de 46.5 bar e uma força no êmbolo de 1790.25 Kg.f muito superior aos 259 Kg.f necessários.

### 2.3.2. Circuito Electrónico

O circuito electrónico deste banco de ensaios possui uma cadeia de actuação e uma cadeia de medida como já foi descrito na secção 1.6.2.3. A cadeia de actuação está descrita na secção 1.6.2.3.1 e não há cálculos a realizar.

Para fazer a medição dos ângulos são usados sensores do tipo inclinómetros que são sensores que medem o ângulo que eles fazem com a vertical através da acção da gravidade.

Para ligar os sensores ao computador é utilizada uma placa de aquisição de dados (*DAQ-Data Aquisition*).

A placa de aquisição de dados é uma placa que recebe um sinal analógico ou digital de um sensor e o converte num sinal digital reconhecido pelo computador. Neste caso, a placa a utilizar é uma NI USB-6008, é uma placa de 12 bits que recebe um sinal analógico de [-10...10] Vdc; transforma um sinal analógico num sinal digital com 12 bits o que dá  $2^{12} = 4096$  combinações possíveis.

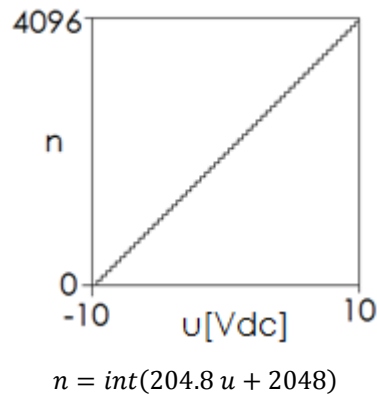


Figura 2.42: Gráfico n vs u

O inclinómetro escolhido é um SI-701AIHPC do fabricante *Columbia*. Este sensor tem como principais características:

- Gama de medida:  $\pm 5^\circ$ ,  $\pm 10^\circ$ ,  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$
- Gama de corrente de saída: 4...20 mA
- Alimentação: +15 Vdc
- Erro de não-linearidade:  $\pm 0.1\%$  F.R.
- Erro de não repetibilidade:  $\pm 0.1\%$  F.R.
- Erro de resolução: 0.001% F.R.

Assim para medir os ângulos das 2 travessas, utilizam-se 2 sensores com uma gama de medida de  $\pm 15^\circ$  e para medir os ângulos das 4 bielas, utilizam-se 4 sensores com uma gama de medida de  $\pm 45^\circ$ .

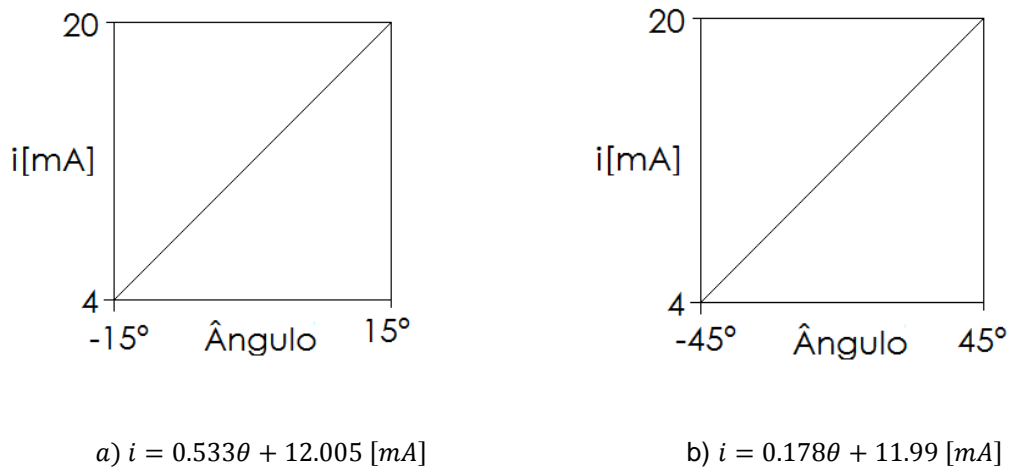


Figura 2.43: Gráficos  $i$  vs ângulo

Como se utilizam 2 gamas de medida diferentes, tem-se também duas cadeias de medida ilustradas nas figuras 2.44 e 2.45.

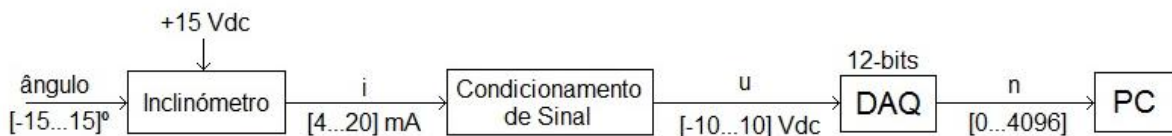


Figura 2.44: Cadeia de medida dos inclinómetros das travessas

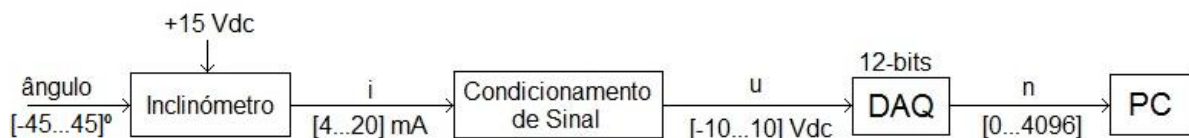


Figura 2.45: Cadeia de medida dos inclinómetros das bielas

Como o sinal de saída dos inclinómetros é de  $[4...20]$  mA, tem de se fazer um condicionamento de sinal para transformar o sinal de saída do sensor  $[4...20]$  mA num sinal reconhecido pela placa de aquisição de dados  $[-10...10]$  Vdc.

Neste condicionamento de sinal são usados 2 circuitos activos com AmpOp's: o primeiro é um conversor corrente-tensão para transformar a corrente que sai do sensor em tensão e o segundo é um circuito subtrator para transformar a tensão que sai do conversor corrente-tensão em  $[-10...10]$  Vdc.



O conversor corrente-tensão é o circuito que está ilustrado na figura 2.46 em que  $u' = i \times R$ .

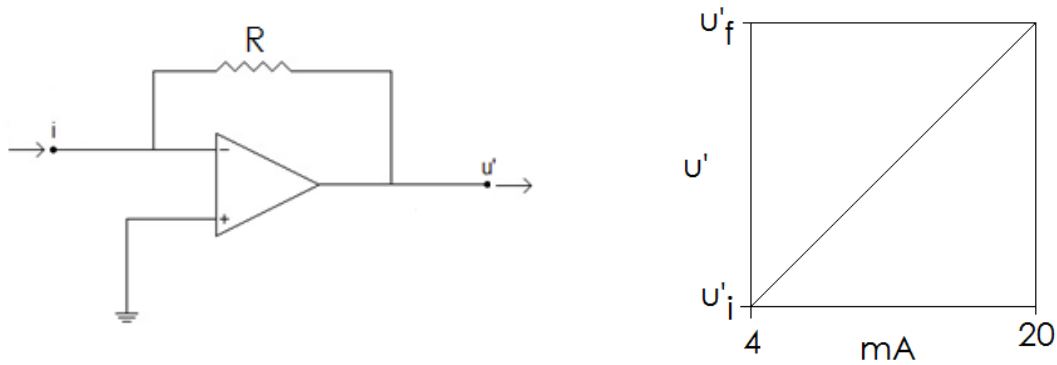


Figura 2.46: Circuito conversor Corrente-Tensão

Como o AmpOp é alimentado a 15 Vdc,  $u'_f$  não pode ser superior a 15 Vdc e  $u'_f - u'_i$  deve ser igual a 10. Então para calcular os valores de R,  $u'_f$  e  $u'_i$  resolve-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} \frac{u'_f}{0.020} = R \\ \frac{u'_i}{0.004} = R \\ u'_f - u'_i = 10 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} u'_f = 12.5 \text{ Vdc} \\ u'_i = 2.5 \text{ Vdc} \\ R = 625 \Omega \end{cases}$$

Agora que se tem os [4...20] mA transformados em [2.5...12.5] Vdc, falta transformar os [2.5...12.5] Vdc em [-10...10] Vdc. O gráfico desta transformação está representado na figura 2.47. A equação deste gráfico é do tipo  $Y=mx+b$ :

$$m = \frac{10 - (-10)}{12.5 - 2.5} = 2$$

$$b = 10 - 2 \times 12.5 = -15$$

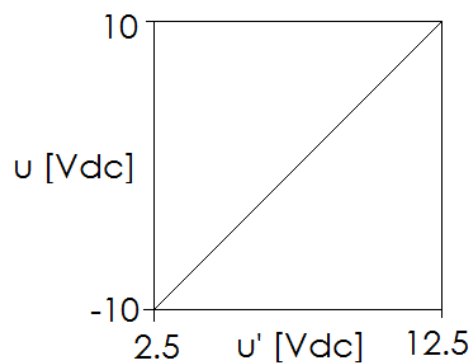


Figura 2.47: Gráfico u vs u'

Esta equação,  $u = 2 \times u' - 15$ , é equivalente à equação,  $u = 2(u' - 7.5)$ , do circuito subtrator representado na figura 2.48.

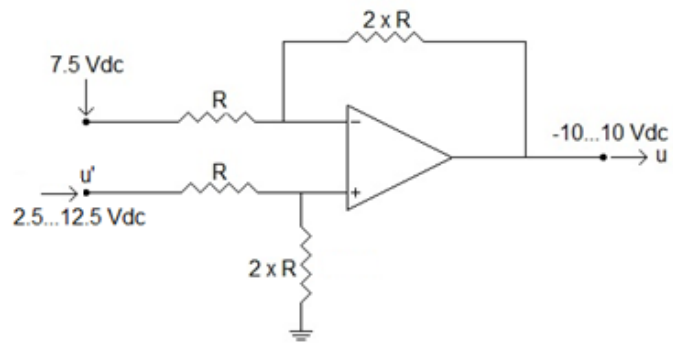


Figura 2.48: Circuito Subtractor

Juntando os dois circuitos obtemos o condicionamento de sinal completo das cadeias de medida, ver figura 2.49:

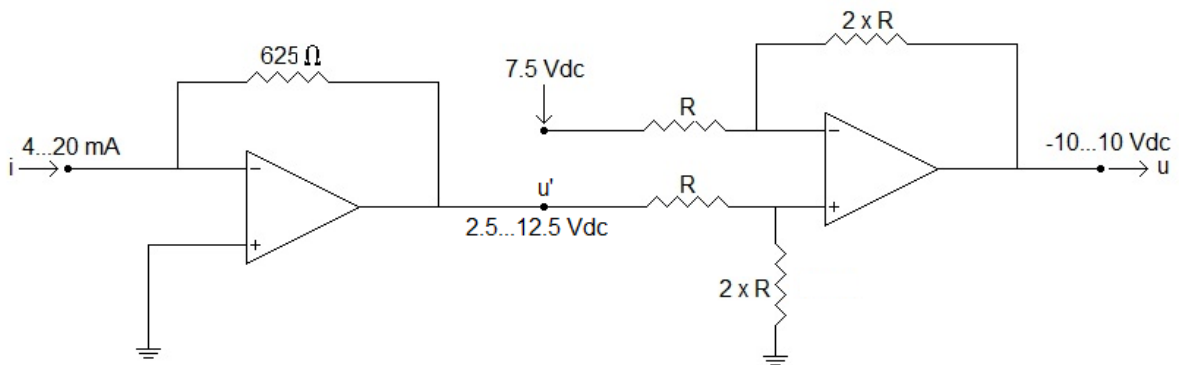


Figura 2.49: Condicionamento de Sinal final

Para a cadeia a cadeia de medida dos inclinómetros das travessas tem-se a seguinte relação:

$$n = \text{int}(204.8 u + 2048)$$

$$u = 2u' - 15$$

$$u' = 625i$$

$$i = (0.533\theta + 12.005)/1000$$

$$n = \text{int}(136.53\theta + 2048)$$

A resolução destes sensores fica igual a:

$$\delta n = \text{int}(136.53\delta\theta)$$

$$\delta n = 1 \Rightarrow \delta\theta = \frac{1}{136.53} = 0.007^\circ$$

A precisão/ erro de cada sensor é dado pela seguinte expressão:

$$\Delta\theta = \delta^s\theta + \Delta^{lin}\theta + \Delta^{rep}\theta = 0.00001 \times 30^\circ + 0.001 \times 30^\circ + 0.001 \times 30^\circ = 0.06^\circ$$

Como a medição do ângulo entre as duas travessas é feita através do sinal de 2 sensores, o erro desta medida é  $2 \times \Delta\theta = 2 \times 0.06^\circ = 0.12^\circ$

Para a cadeia a cadeia de medida dos inclinómetros das bielas tem-se a seguinte relação:

$$n = \text{int}(204.8 u + 2048)$$

$$u = 2u' - 15$$

$$u' = 625i$$

$$i = (0.178 + 11.99)/1000$$

$$n = \text{int}(45.51\theta + 2048)$$

A resolução destes sensores fica igual a:

$$\delta n = \text{int}(45.51\delta\theta)$$

$$\delta n = 1 \Rightarrow \delta\theta = \frac{1}{45.51} = 0.02^\circ$$

A precisão/ erro de cada sensor é dado pela seguinte expressão:

$$\Delta\theta = \delta^s\theta + \Delta^{lin}\theta + \Delta^{rep}\theta = 0.00001 \times 90^\circ + 0.001 \times 90^\circ + 0.001 \times 90^\circ = 0.18^\circ$$

Como a medição do ângulo entre as duas travessas é feita através do sinal de 2 sensores, o erro desta medida é  $2 \times \Delta\theta = 2 \times 0.18^\circ = 0.36^\circ$

### 3. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Neste documento apresenta-se o projecto de um banco de ensaios a construir no âmbito do reforço do equipamento ao dispor da empresa EMEF. Neste projecto o cálculo estrutural foi realizado tendo por base o Eurocódigo 3 e assumindo simplificações por forma a tornar a estrutura estaticamente determinada, e pelo método de elementos finitos (método numérico) usando a técnica de vigas 3-D. Comparando os dois resultados, verifica-se que no método apresentado pelo Eurocódigo 3, as tensões são superiores às obtidas pelo método de elementos finitos uma vez que neste foram feitas simplificações para que um só elemento suporte um determinado esforço quando na realidade esse esforço é distribuído por vários elementos, como na realidade acontece e os E.F. comprovam. O MEF é um método que dá resultados com muito detalhe e com muita precisão mas também requer sentido crítico de quem usa o método para poder interpretar os resultados obtidos. A estrutura de suporte está sobre dimensionada, a sua rigidez garante precisão na medição dos ângulos pretendidos, o principal requisito deste projecto.

Também foram dimensionados e seleccionados os componentes do circuito hidráulico e do circuito electrónico.

Em estudos futuros poderá otimizar-se ou desenvolver-se o circuito electrónico uma vez que este está muito simples e pouco robusto ao ruído e à precisão dos próprios componentes e os sensores (inclinómetros) seleccionados são caros.

Em relação ao carro móvel optou-se por comprar um já fabricado em série por ficar muito mais barato que a construção de um novo. É muito importante que um engenheiro ao projectar um componente tenha “sensibilidade” para os custos de fabrico a fim de minimizar os mesmos.

Futuramente poderá ser desenvolvido/projectado um novo banco de ensaios mais eficiente e possivelmente mais barato.

Sendo a indústria ferroviária uma referência da engenharia mecânica em Portugal, na área da manutenção há ainda muito trabalho a fazer em inovação e desenvolvimento, nomeadamente na criação de bancos de ensaios e ferramentas especiais para facilitar o trabalho aos operários e reduzir os custos de manutenção do equipamento ferroviário.

Também são muito importantes as parcerias entre empresas e universidades já que proporcionam aos alunos um maior contacto com a indústria e com o mercado de trabalho mesmo antes de terminarem os cursos superiores.

## 4. Referências

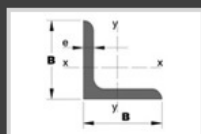
- [1] NP EN 1990, Eurocódigo - Bases para o projecto de estruturas, Dezembro 2009
- [2] NP EN 1993, Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço (partes 1 e 8), Março 2010
- [3] Parlamento Europeu e do Conselho de 17 Maio de 2006, "Directiva 2006/42/CE," *Jornal Oficial da União Europeia de 9 de Junho de 2006*, no. Directiva europeia relativa às máquinas.
- [4] NP EN ISSO 13920:1996, Soldadura-Tolerâncias gerais para construção soldada, Março 2006
- [5] Chagas. (2º Edição 2002) Manual Técnico de Produtos Siderúrgicos. [Online]. <http://www.fachagas.pt/cache/bin/XPQWfpAXX56UzkZMyMbs1ZKU.pdf> (Abril de 2011)
- [6] Grupo Ferpinta. Catálogo de Produtos Siderúrgicos [Online] [www.ferpinta.pt](http://www.ferpinta.pt) (Abril de 2011)
- [7] J. N. Reddy, *An Introduction To The Finite Element Method*, Third Edition ed. McGraw-Hill Science Engineering, December 2004.
- [8] F. P. Beer and E. R. Johnston, *Mechanics of Materials*. 4ª edição, McGraw-Hill, 2006. J. E. Shigley, C. R. Mischke, and R. G. Budynas, *Mechanical Engineering Design*. 8ª edição, McGraw-Hill, 2008
- [10] A. Silva, J. Dias, and L. Sousa, *Desenho Técnico Moderno*. 5ª Edição LIDEL, 2004.
- [11] K. Ogata, *Engenharia de Controle Moderno*. 4ª Edição Pearson Prentice Hall, 2003
- [12] MRA-Instrumentação. Catálogo de sensores [Online] <http://www.mra.pt/industria/produtos/instrumentacao/sensores-e-condicionadores-de-sinal/sensores-de-posicionamento-angular---inclinometros/> (Junho de 2011)
- [13] RS - Components. Distribuidor de componentes electrónicos [Online] <http://pt.rs-online.com/web/> (Junho de 2011)
- [14] Legrand. Catálogo de componentes eléctricos [Online] <http://www.e-catalogue.legrandgroup.com/portugal/index.html?showTarif=true> (Junho de 2011)
- [15] Cudell®. Óleo-Hidráulica/Automação Industrial. Catálogo 2011
- [16] Facom®. Catálogo Acções Especiais. 2010

## 5. Anexos

### Anexo A – Catálogo de Perfis UPN (Grupo Ferpinta)

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS											
Dimensões (mm)				Secção (cm <sup>2</sup> )	Massa Linear (Kg/m)	Momentos de Inercia		Mod. de Resistência		Raio de Giração	
H	x	B	e			bx (cm <sup>4</sup> )	lyy (cm <sup>4</sup> )	Wxx (cm <sup>3</sup> )	Wyy (cm <sup>3</sup> )	bx (cm)	lyy (cm)
80	x	45	6	11.0	8.64	106	19.4	26.5	6.36	3.10	1.33
100	x	50	6	13.5	10.60	206	29.3	41.2	8.49	3.91	1.47
120	x	55	4	17.0	13.35	364	43.2	60.7	11.10	4.62	1.59
140	x	60	7	20.4	16.00	605	62.7	86.4	14.80	5.45	1.75
160	x	65	7,5	24.0	18.85	925	85.3	116.0	18.30	6.21	1.89
180	x	70	8	28.0	22.00	1350	114.0	150.0	22.40	6.95	2.02
200	x	75	8,5	32.2	25.30	1910	148.0	191.0	27.00	7.70	2.14
220	x	80	9	37.4	29.40	2690	197.0	245.0	33.60	8.48	2.26
240	x	85	9,5	42.3	33.20	3600	248.0	300.0	39.60	9.22	2.42
260	x	90	10	48.3	37.90	4820	317.0	371.0	47.70	9.99	2.56
280	x	95	10	53.3	41.80	6280	399.0	448.0	57.20	10.90	2.74
300	x	10	10	58.8	46.20	8030	495.0	535.0	67.80	11.70	2.90
400	x	110	14	91.5	71.80	20350	846.0	1020.0	102.00	14.90	3.04

## Anexo B – Catálogo de Cantoneiras (Grupo Ferpinta)



### CANTONEIRAS DE ABAS IGUAIS

EN 10056-1/2

Medidas correntes

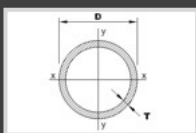
S235JR - S275JR (EN 10025-2)

Designação do aço

#### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Dimensões (mm)	Espessura (mm)	Seção (cm <sup>2</sup> )	Massa Linear (Kg/m)	Momentos de Inércia		Mod. de Resistência		Raio de giração	
				<i>i<sub>xx</sub></i> (cm <sup>4</sup> )	<i>i<sub>yy</sub></i> (cm <sup>4</sup> )	<i>W<sub>xx</sub></i> (cm <sup>3</sup> )	<i>W<sub>yy</sub></i> (cm <sup>3</sup> )	<i>i<sub>xx</sub></i> (cm)	<i>i<sub>yy</sub></i> (cm)
16 x 16	2,50	0,75	0,59	0,2	0,28	0,15	0,25	0,46	0,58
16 x 16	3,00	0,88	0,69	0,2	0,32	0,18	0,28	0,46	0,58
20 x 20	3,00	1,12	0,88	0,4	0,62	0,28	0,44	0,59	0,74
20 x 20	4,00	1,45	1,14	0,4	0,77	0,35		0,58	0,73
25 x 25	3,00	1,42	1,11	0,8	1,27	0,45	0,72	0,75	0,95
25 x 25	4,00	1,85	1,45	1,0	1,61	0,58	0,91	0,74	0,93
25 x 25	5,00	2,27	1,78	1,2	1,89	0,70	1,07	0,72	0,91
30 x 30	3,00	2,72	1,35	1,4	2,29	0,67	1,08	0,91	1,15
30 x 30	4,00	2,25	1,77	1,8	2,85	0,86	1,34	0,89	1,12
30 x 30	5,00	2,76	2,17	2,2	3,41	1,04	1,60	0,88	1,11
35 x 35	3,50	2,34	1,84	2,7	4,21	1,05	1,70	1,06	1,34
35 x 35	4,00	2,65	2,08	3,0	4,68	1,18	1,87	1,05	1,33

## Anexo C – Catálogo de Perfis Ocos Circulares (Grupo Ferpinta)



PERFIS OCOS CIRCULARES

EN 10219-1/2

S235JRH - S275JOH - S355J2H (EN 10025-2)

Designação do aço

I - Momento de Inércia (cm<sup>4</sup>)

W - Módulo Resistência Elástico (cm<sup>3</sup>)

i - Raio de Giração (cm)

### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Diâmetro (mm) D	Espessura (mm) T	Tubos por Atado	Massa Linear (kg/m)	Peso por Atado (Kg)	Secção (cm <sup>2</sup> )	I - Momento de Inércia (cm <sup>4</sup> )	W - Módulo Resistência Elástico (cm <sup>3</sup> )	i - Raio de Giração (cm)
21,3	2,0	331	0,95	1887	1,21	0,57	0,54	0,69
21,3	2,5	331	1,16	2304	1,48	0,66	0,62	0,67
21,3	3,0	331	1,35	2681	1,72	0,74	0,70	0,66
26,9	2,0	271	1,23	2000	1,56	1,22	0,91	0,88
26,9	2,5	271	1,50	2439	1,92	1,44	1,07	0,87
26,9	3,0	271	1,77	2878	2,25	1,63	1,21	0,85
30,0	3,0	217	2,00	2601	2,54	1,37	1,56	0,96
33,7	2,0	127	1,56	1189	1,99	2,51	1,49	1,12
33,7	2,5	127	1,92	1463	2,45	3,00	1,78	1,11
33,7	3,0	127	2,27	1730	2,89	3,44	2,04	1,09
40,0	3,0	127	2,78	2116	3,49	6,01	3,00	1,31
42,4	2,0	127	1,99	1516	2,54	5,19	2,45	1,43
...								
219,1	12,5	7	63,70	2675	81,10	4345,00	397,00	7,32
244,5	4,0	5	23,70	711	30,21	2184,57	178,70	8,50
244,5	5,0	5	29,50	885	37,60	2699,00	221,00	8,47
244,5	6,0	5	35,30	1059	45,00	3199,00	262,00	8,43
244,5	6,3	5	37,00	1110	47,10	3346,00	274,00	8,42
244,5	7,0	5	41,00	1230	52,20	3683,88	301,34	8,40
244,5	8,0	5	46,70	1401	59,40	4160,00	340,00	8,37



## Anexo D – APDL

### Análise de Tensões e Deslocamentos

```
FINISH  
/CLEAR
```

```
/NOPR  
/PMETH,OFF,0  
KEYW,PR_SET,1  
KEYW,PR_STRUC,1 ! Indica que se trata de um problema estrutural  
KEYW,PR_THERM,0  
KEYW,PR_FLUID,0  
KEYW,PR_ELMAG,0  
KEYW,MAGNOD,0  
KEYW,MAGEDG,0  
KEYW,MAGHFE,0  
KEYW,MAGELC,0  
KEYW,PR_MULTI,0  
KEYW,PR_CFD,0  
/GO
```

```
/PREP7
```

! Insere os Keypoints

```
K, ,0,0,1112,  
K, ,760,0,1112,  
K, ,1240,0,1112,  
K, ,2000,0,1112,  
K, ,760,780,1112,  
K, ,760,1000,1112,  
K, ,1240,780,1112,  
K, ,1240,1000,1112,  
K, ,760,0,332,  
K, ,1240,0,332,  
K, ,0,0,-1112,  
K, ,760,0,-1112,  
K, ,1240,0,-1112,  
K, ,2000,0,-1112,  
K, ,760,780,-1112,  
K, ,760,1000,-1112,  
K, ,1240,780,-1112,  
K, ,1240,1000,-1112,  
K, ,760,0,-332,  
K, ,1240,0,-332,
```

!Insere as Linhas

```
L,2,1  
L,3,2  
L,4,3  
L,2,9  
L,9,19  
L,19,12  
L,13,20  
L,20,10  
L,10,3
```

L,11,12  
L,12,13  
L,13,14  
L,5,2  
L,6,5  
L,7,8  
L,3,7  
L,8,6  
L,15,12  
L,16,15  
L,18,16  
L,17,18  
L,13,17  
L,2,8  
L,3,6  
L,1,6  
L,4,8  
L,5,9  
L,7,10  
L,12,18  
L,13,16  
L,11,16  
L,14,18  
L,15,19  
L,17,20

! Define o elemento a usar  
ET,1,BEAM188

! Define as Propriedades do material (Aco)  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,0  
MPDATA,EX,1,,210000 ! Atribui Modulo de Young (210000 MPa)  
MPDATA,PRXY,1,,0.3 ! Atribui coeficiente de Poisson (0.3)

! Define as seccoes  
SECTYPE, 1, BEAM, CHAN, UPN80x45, 0  
SECOFFSET, CENT  
SECDATA,45,45,80,6,6,6,0,0,0,0

SECTYPE, 2, BEAM, L, Cantoneira30x30x4, 0  
SECOFFSET, CENT  
SECDATA,30,30,4,4,0,0,0,0,0,0

SECTYPE, 3, BEAM, RECT, Placa Apoio, 0  
SECOFFSET, CENT  
SECDATA,260,10,0,0,0,0,0,0,0,0

! Atribuicao dos perfis UPN as linhas correspondentes  
FLST,5,6,4,ORDE,4  
FITEM,5,1  
FITEM,5,-3  
FITEM,5,7  
FITEM,5,-9  
CM,\_Y,LINE  
LSEL, , , P51X  
CM,\_Y1,LINE

CMSEL,S,\_Y

CMSEL,S,\_Y1  
LATT,1, ,1, , 7, ,1  
CMSEL,S,\_Y  
CMDELE,\_Y  
CMDELE,\_Y1

FLST,5,6,4,ORDE,4  
FITEM,5,4  
FITEM,5,-6  
FITEM,5,10  
FITEM,5,-12  
CM,\_Y,LINE  
LSEL, , , ,P51X  
CM,\_Y1,LINE  
CMSEL,S,\_Y

CMSEL,S,\_Y1  
LATT,1, ,1, , 15, ,1  
CMSEL,S,\_Y  
CMDELE,\_Y  
CMDELE,\_Y1

FLST,5,8,4,ORDE,6  
FITEM,5,13  
FITEM,5,-16  
FITEM,5,18  
FITEM,5,19  
FITEM,5,21  
FITEM,5,22  
CM,\_Y,LINE  
LSEL, , , ,P51X  
CM,\_Y1,LINE  
CMSEL,S,\_Y

CMSEL,S,\_Y1  
LATT,1, ,1, , , ,1  
CMSEL,S,\_Y  
CMDELE,\_Y  
CMDELE,\_Y1

! Atribuicao dos perfis L as linhas correspondentes

FLST,5,12,4,ORDE,4  
FITEM,5,23  
FITEM,5,-28  
FITEM,5,29  
FITEM,5,-34  
CM,\_Y,LINE  
LSEL, , , ,P51X  
CM,\_Y1,LINE  
CMSEL,S,\_Y

!\*

!\*

CMSEL,S,\_Y1  
LATT,1, ,1, , , ,2  
CMSEL,S,\_Y

```
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
```

```
! Atribuicao das Placas dos Apoios as linhas correspondentes
```

```
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,17
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
!*
!*
CMSEL,S,_Y1
LATT,1, ,1, ,2, ,3
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
```

```
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,20
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
!*
!*
CMSEL,S,_Y1
LATT,1, ,1, ,12, ,3
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
```

```
! Faz a malha
LESIZE,ALL,100, , , ,1, , ,1, , ! Comprimento do elemento=100 mm
LMESH,ALL
```

```
! Aplica as Condiçoes de Fronteira
```

```
FLST,2,4,3,ORDE,4
FITEM,2,2
FITEM,2,3
FITEM,2,12
FITEM,2,13
```

```
/GO
DK,P51X, , , ,0,UX,UY,UZ, , , ,
```

```
FLST,2,4,3,ORDE,4
FITEM,2,1
FITEM,2,4
FITEM,2,11
FITEM,2,14
!*
/GO
DK,P51X, , , ,0, ,UY, , , , ,
```

```
! Aplica as Forças
FLST,2,4,3,ORDE,4
FITEM,2,6
FITEM,2,8
FITEM,2,16
FITEM,2,18
!*
/GO
FK,P51X,FZ,1141.5 ! FX - Transversal ou FZ - Longitudinal
```

```
FLST,2,4,3,ORDE,4
FITEM,2,6
FITEM,2,8
FITEM,2,16
FITEM,2,18
!*
/GO
FK,P51X,FY,-3805
```

```
! Obtem Solucao
/SOL
Solve
FINISH
```

```
! Resultados
/POST1
```

```
/ESHAPE,1.0
```

```
! Mostra o grafico das tensoes equivalentes
PLNSOL,S,EQV
```

```
! Mostra o campo de deslocamentos
PLNSOL,U,SUM
```

## **Verificação da estrutura inclinada a 45°**

```
FINISH
/CLEAR
```

```
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1 ! Indica que se trata de um problema estrutural
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO
```

/PREP7

! Inere os Keypoints

K, ,0,0,1112,  
K, ,760,0,1112,  
K, ,1240,0,1112,  
K, ,2000,0,1112,  
K, ,760,780,1112,  
K, ,760,1000,1112,  
K, ,1240,780,1112,  
K, ,1240,1000,1112,  
K, ,760,0,332,  
K, ,1240,0,332,  
K, ,0,0,-1112,  
K, ,760,0,-1112,  
K, ,1240,0,-1112,  
K, ,2000,0,-1112,  
K, ,760,780,-1112,  
K, ,760,1000,-1112,  
K, ,1240,780,-1112,  
K, ,1240,1000,-1112,  
K, ,760,0,-332,  
K, ,1240,0,-332,

! Inere as Linhas

L,2,1  
L,3,2  
L,4,3  
L,2,9  
L,9,19  
L,19,12  
L,13,20  
L,20,10  
L,10,3  
L,11,12  
L,12,13  
L,13,14  
L,5,2  
L,6,5  
L,7,8  
L,3,7  
L,8,6  
L,15,12  
L,16,15  
L,18,16  
L,17,18  
L,13,17  
L,2,8  
L,3,6  
L,1,6  
L,4,8  
L,5,9  
L,7,10  
L,12,18  
L,13,16  
L,11,16  
L,14,18  
L,15,19  
L,17,20

! Define o elemento a usar  
ET,1,BEAM188

! Define as Propriedades do material (Aco)  
MPTEMP,,,,,,,,  
MPTEMP,1,0  
MPDATA,EX,1,,210000 ! Atribui Modulo de Young (210000 MPa)  
MPDATA,PRXY,1,,0.3 ! Atribui coeficiente de Poisson (0.3)

! Define as seccoes  
SECTYPE, 1, BEAM, CHAN, UPN80x45, 0  
SECOFFSET, CENT  
SECDATA,45,45,80,6,6,6,0,0,0,0

SECTYPE, 2, BEAM, L, Cantoneira30x30x4, 0  
SECOFFSET, CENT  
SECDATA,30,30,4,4,0,0,0,0,0,0

SECTYPE, 3, BEAM, RECT, Placa Apoio, 0  
SECOFFSET, CENT  
SECDATA,260,10,0,0,0,0,0,0,0,0

! Atribuicao dos perfis UPN as linhas correspondentes

FLST,5,6,4,ORDE,4  
FITEM,5,1  
FITEM,5,-3  
FITEM,5,7  
FITEM,5,-9  
CM,\_Y,LINE  
LSEL, , , ,P51X  
CM,\_Y1,LINE  
CMSEL,S,\_Y

CMSEL,S,\_Y1  
LATT,1, ,1, , 7, ,1  
CMSEL,S,\_Y  
CMDELE,\_Y  
CMDELE,\_Y1

FLST,5,6,4,ORDE,4  
FITEM,5,4  
FITEM,5,-6  
FITEM,5,10  
FITEM,5,-12  
CM,\_Y,LINE  
LSEL, , , ,P51X  
CM,\_Y1,LINE  
CMSEL,S,\_Y

CMSEL,S,\_Y1  
LATT,1, ,1, , 15, ,1  
CMSEL,S,\_Y  
CMDELE,\_Y  
CMDELE,\_Y1

```
FLST,5,8,4,ORDE,6
FITEM,5,13
FITEM,5,-16
FITEM,5,18
FITEM,5,19
FITEM,5,21
FITEM,5,22
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
```

```
CMSEL,S,_Y1
LATT,1, ,1, , , ,1
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
```

! Atribuicao dos perfis L as linhas correspondentes

```
FLST,5,12,4,ORDE,4
FITEM,5,23
FITEM,5,-28
FITEM,5,29
FITEM,5,-34
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
```

!\*  
!\*  
CMSEL,S,\_Y1

```
LATT,1, ,1, , , ,2
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
```

! Atribuicao das Placas dos Apoios as linhas correspondentes

```
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,17
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
```

!\*  
!\*  
CMSEL,S,\_Y1

```
LATT,1, ,1, ,2, ,3
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
```

```
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,20
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
```



```
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
!*
!*
CMSEL,S,_Y1
LATT,1,,1,,12,,3
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
```

```
! Faz a malha
LESIZE,ALL,100,,,,,1,,,1,
LMESH,ALL
```

```
! Aplica as Condiçoes de Fronteira
FLST,2,2,3,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,11
```

```
/GO
DK,P51X,ALL,,0,,,,,
```

```
! Aplica as Forças
FLST,2,4,3,ORDE,4
FITEM,2,6
FITEM,2,8
FITEM,2,16
FITEM,2,18
!*
/GO
FK,P51X,FX,-3071.57
```

```
FLST,2,4,3,ORDE,4
FITEM,2,6
FITEM,2,8
FITEM,2,16
FITEM,2,18
!*
/GO
FK,P51X,FY,-3071.57
```

```
! Obtem Solucao
/SOL
Solve
FINISH
```

```
! Resultados
/POST1
```

```
/ESHAPE,1.0
```

```
! Mostra o grafico das tensoes equivalentes
PLNSOL,S,EQV
```

## **Anexo E – Desenhos Técnicos da Estrutura de Suporte**