



# APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DE VALOR A MECANISMOS DE BARREIRA PARA APLICAÇÕES FERROVIÁRIAS

**GONÇALO VAZ MARQUES**

julho de 2017

# **APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DE VALOR A MECANISMOS DE BARREIRA PARA APLICAÇÕES FERROVIÁRIAS**

Gonçalo Vaz Marques

**2017**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

# **APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DE VALOR A MECANISMOS DE BARREIRA PARA APLICAÇÕES FERROVIÁRIAS**

Gonçalo Vaz Marques  
1080819

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto

**2017**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica

POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

# JÚRI

## **Presidente**

Doutor Rui Pedro Cardoso da Silva Martinho  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Orientador**

Doutor Francisco José Gomes da Silva  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Arguente**

Doutor José Duarte Ribeiro Marafona  
Professor Auxiliar, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, os meus agradecimentos ao orientador da dissertação Doutor Francisco José Gomes da Silva pelo apoio durante todo o processo.

Ao Eng.º José Mário Fonseca que, como representante da EFACEC - Engenharia e Sistemas neste projeto, disponibilizou informação, procedeu à avaliação e validação das ideias desenvolvidas.

Um agradecimento especial à minha família, pelo apoio durante todo o meu percurso e, aos meus amigos que sempre me apoiaram.



**PALAVRAS-CHAVE**

Ferrovias, Passagens de nível, Análise de Valor, Engenharia de Valor, Análise FMEA

**RESUMO**

Os mecanismos de barreiras aplicados no universo ferroviário existem desde há várias décadas, tendo sempre tido como primeira preocupação a garantia da segurança funcional da sua utilização. Para o conseguir, foram sempre recorrendo a técnicas e tecnologias de grande maturidade à data do seu desenvolvimento. Como consequência, estes equipamentos apresentaram sempre um custo relativamente alto, quando comparados com outros semelhantes utilizados noutra tipo de aplicações, e tiveram ciclos de vida mais longos. Este alongamento dos ciclos de vida faz, ainda hoje, com que, no fim desses ciclos, os equipamentos apresentem problemas de obsolescência dos seus componentes.

Este trabalho teve como base os mecanismos de meia barreira X Safe da EFACEC, aplicados em passagens de nível em diversos locais, em Portugal e no estrangeiro. Após uma análise dos componentes do mecanismo, processos de fabrico e falhas mais comuns, procedeu-se a uma cuidada avaliação das soluções aplicadas pela concorrência em sistemas equivalentes. O protótipo resultante deste trabalho permitiu baixar o preço do equipamento, e mostrar um leque variado de opções que podem passar a ser aplicadas, de modo a que o preço se mantenha reduzido e que evitem falhas graves do sistema na sua aplicação no terreno.



**KEYWORDS**

*Railway; Level crossing barriers; Value Analysis; Value Engineering; FMEA.*

**ABSTRACT**

Level crossing barriers mechanisms applied in the railway environment are in use for several decades, having always considered as first concern ensuring its functional safety. To achieve this, they have always been used techniques with great technology maturity regarding the time of the development. As a result, these devices have always presented a high cost and longer life cycles, when compared with similar devices used in other types of applications. This lengthening of life cycles is today, in the end of these cycles, presenting problems of its components due to equipment obsolescence.

This work was based on the EFACEC X Safe half-barrier mechanism, applied at level crossings in several places, in Portugal and abroad. After an analysis of the mechanism components, manufacturing processes and most common failure events, a careful evaluation of the solutions applied by the competitors in similar systems was carried out. The prototype resulting from this work allowed lowering the price of the equipment, and to demonstrate a varied range of options those can be applied in order to keep the price low and avoid serious failures of the system on the ground.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

<b>Termo</b>	<b>Designação</b>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
AV	Análise de Valor
A5	Alongamento
AF	Análise Funcional
BLDCs	<i>Brushless DC Motor</i>
CCTV	<i>Closed-Circuit Television</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DOD	<i>Departement of Defense</i>
EF	Elementos Finitos
EMI	<i>Electro-Magnetic Interference</i>
EV	Engenharia de Valor
FAST	<i>Function Analysis System Technique</i>
FMEA	<i>Failure Mode Efect Analysis</i>
HRC	Dureza Rockwel C
LASER	<i>Light amplification by stimulated emission of radiation</i>
LDX	<i>Lean Duplex</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MTTF	Tempo médio de funcionamento até ocorrer falha
MTBF	Tempo médio entre falhas
MTTR	Tempo médio para reparar
PN	Passagem de Nível
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
PRFV	Perfil reforçado com fibra de vidro
SAF	<i>Sandvik Austenite Ferrite</i>
SWOT	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
UE	União Europeia

### Lista de Unidades

<b>Termo</b>	<b>Designação</b>
A	Ampere
kg	Quilograma
kgf	Quilograma-força
m	Metro
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal

m/s	Metro por segundo
N	Newton
N.m	Newton-metro
s	Segundo
rpm	Rotações por minuto
V	Volt
W	Watt
$\alpha$	Angulo de pressão
$\lambda(t)$	Falhas por unidade de tempo de trabalho
€	Euro
°C	Graus Celcius

#### Lista de Símbolos

<b>Termo</b>	<b>Designação</b>
b	Largura
C	Tipo de carga
d	Diâmetro
E	Constante de elasticidade
f	Frequência
Fs	Fator de segurança
Ft	Força tangencial
F(t)	Probabilidade de falha de um elemento
H	Altura
I	Relação de engrenagem
K	Fator de concentração de tensões
Kl	Fator de vida
Ko	Fator de sobrecarga
Kv	Fator de velocidade
Lb	Comprimento mínimo para a chaveta resistir à tensão de esmagamento
LS	Comprimento mínimo para a chaveta resistir à tensão de corte
L10	<i>90 % de confiança para que o rolamento atinja ou ultrapasse a vida útil</i>
m	Módulo do sector dentado
mn	Módulo da engrenagem
Mf	Momento fletor
Mt	Momento torsor
nf(t)	Número de elementos que falham em função do tempo
nf(t)/n	Elementos falhados por número de elementos
Nx	Carga axial
P	Força radial equivalente

---

$R_b$	Raio primitivo
$R_e$	Tensão de limite elástico
$R_m$	Tensão de rotura
$R(t)$	Fiabilidade de um elemento
$W_1$	Peso da engrenagem
$y_1$	Distância da engrenagem
$Y^e$	Fator de distribuição de tensão
$Y_f$	Fator de forma de Lewis
$Y_\beta$	Fator angular
$Z$	Número de dentes de uma engrenagem
$\sigma_a$	Tensão amplitude
$\sigma_{ced}$	Tensão de cedência
$\sigma_f$	Resistência à tração
$\sigma_{lim}$	Tensão limite de cedência
$\sigma_{max}^{VM}$	Tensão máxima de Von Mises
$\sigma_m^{VM}$	Tensão média de Von Mises
$\rho$	Densidade
$\lambda(t)$	Taxa de Falha

---



## GLOSSÁRIO DE TERMOS

<b>Termo</b>	<b>Designação</b>
<i>Down time</i>	Tempo que o equipamento se encontra parado, devido a uma falha
Falha	Ocorre quando um sistema interrompe a sua função específica
Falha segura	Falha que salvaguarda a perda de vidas
Falha não segura	Falha que pode causar perda de vidas
Função	Fim ou uso específico de um objeto
Manutibilidade	Possibilidade de um sistema quando falha, sofrer uma reparação ou restauro num determinado período de tempo
Necessidades	Satisfação de uma função
Recursos	Material utilizado para satisfazer uma função
<i>Up time</i>	Tempo que o equipamento funciona sem falhar
Utilizador	Qualquer pessoa ou organização para quem o produto é concebido e que explora as suas funções durante o seu ciclo de vida



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – UM DOS PRIMEIROS COMBOIOS EM INGLATERRA ( <a href="http://HISTORYOFLIVERPOOL.COM/LIVERPOOL_RAILWAY_HISTORY/">HISTORYOFLIVERPOOL.COM/LIVERPOOL_RAILWAY_HISTORY/</a> )	35
FIGURA 2 - TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE MERCADORIAS DA CP CARGA, USADO PARA EXPORTAÇÃO DE BENS ( <a href="http://HIVEMINER.COM/TAG/TRANSPORTEDECONTENTORES">HIVEMINER.COM/TAG/TRANSPORTEDECONTENTORES</a> ).	36
FIGURA 3 – EXEMPLO DE UMA PASSAGEM DE NIVEL DA EFACEC (ARQUIVO EFACEC).	37
FIGURA 4 – ACIDENTE ENTRE UM VEÍCULO E UM ALFA PENDULAR NUMA PASSAGEM DE NIVEL (JORNAL DE NOTÍCIAS, 1 DE FEVEREIRO DE 2013)	38
FIGURA 5 – CONTA - EIXOS PARA A DETEÇÃO DE COMBOIOS, OS QUAIS CONTAM O NÚMERO DE EIXOS QUE ENTRAM E SAEM DA ZONA DA PN ( <a href="http://RAILENGINEER.UK">RAILENGINEER.UK</a> ).	39
FIGURA 6 - DIFERENTES TIPOS DE COMPORTAMENTO DA TAXA DE FALHAS DE UM COMPONENTE EM FUNÇÃO DO TEMPO (PORTAL ACTION).	41
FIGURA 7 - RELAÇÃO DA FIABILIDADE (R) E FALHA (F), AO LONGO DE UM DETERMINADO TEMPO $T$ ( <a href="http://DIGIKET.BD">DIGIKET.BD</a> )	43
FIGURA 8 - EXEMPLO DE UM SISTEMA COM REDUNDÂNCIA ATIVA TOTAL (SANDRA RAMOS,2016, TEXTO DE APOIO À DISCIPLINA DE FIABILIDADE E MANUTENÇÃO, INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO, PORTO).	45
FIGURA 9 - EXEMPLO DE UM SISTEMA COM REDUNDÂNCIA ATIVA PARCIAL (SANDRA RAMOS,2016, TEXTO DE APOIO À DISCIPLINA DE FIABILIDADE E MANUTENÇÃO, INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO, PORTO)	46
FIGURA 10 - EXEMPLO DE UM SISTEMA COMBINADO SANDRA RAMOS,2016, (TEXTO DE APOIO À DISCIPLINA DE FIABILIDADE E MANUTENÇÃO, INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO, PORTO)	46
FIGURA 11 – EXEMPLO DA ORGANIZAÇÃO DAS FUNÇÕES NUM DIAGRAMA FAST	51
FIGURA 12 - PERSPETIVA DA PN DA EFACEC PELO LADO CONTRÁRIO À BARREIRA (A) E PELO LADO DA BARREIRA (B)	56
FIGURA 13 – ESQUEMA DA ORGANIZAÇÃO DAS ENGRENAGENS NO REDUTOR	58
FIGURA 14 – TRAVÃO ELETROMAGNÉTICO E EIXO DA MANIVELA	58
FIGURA 15 – PERSPETIVA DO VEIO PRINCIPAL E DA PARTE SUPERIOR DO DENTADO SOLDADO.	60
FIGURA 16 – CHUMACEIRA, COM DESTAQUE PARA O NÍVEL DE ÁGUA ARMazenado E SEUS EFEITOS (1)	61
FIGURA 17 – PERSPECTIVA DO PEDESTAL COM CAIXA PARA BORNES	62
FIGURA 18 - SISTEMA DE PN, COM BARREIRA DE SECÇÕES RETANGULARES DE ALUMÍNIO (INFRAESTRUTURAS DE PORTUGAL)	62
FIGURA 19 – MECANISMO DA ALSTOM (A) E MECANISMO DA ANSALDO (B) (ARQUIVO EFACEC)	63
FIGURA 20 - MECANISMO SIEMENS AUSTRÁLIA (SIEMENS)	64
FIGURA 21 – PEDESTAL DA ANSALDO (A) E PEDESTAL DA SWEIZER (B) (ARQUIVO EFACEC)	64
FIGURA 22 – SISTEMA <i>WAYGUARD SIM 6/13</i> , DA SIEMENS, COM A BARREIRA EM PERFIL PULTRUDIDO ( <i>SIEMENS LEVEL-CROSSING PROTECTION SYSTEMS</i> )	65
FIGURA 23 – EXEMPLO DE MOTOR HIDRÁULICO (DIRECT INDUSTRY)	67
FIGURA 24 – COMPONENTES INTERNOS DE UM MOTOR SEM ESCOVAS ( <i>DESIGN WORLD</i> )	68
FIGURA 25 – OXIDAÇÃO BRANCA NUM VEIO DE UM MECANISMO	73

FIGURA 26 – EXEMPLO DA APLICÇÃO DE <i>PARCOLUBRITE</i> (OXIDAÇÃO A NEGRO), NUMA ENGRENAGEM ( <a href="https://www.youtube.com/watch?v=LIGOIOTN8GO">HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=LIGOIOTN8GO</a> )	74
FIGURA 27 – COMPONENTE SUJEITO A UM BANHO DE NIQUELAGEM ( <a href="http://INDUSTRIALMETALFINISHING.NET/METAL-PLATING">INDUSTRIALMETALFINISHING.NET/METAL-PLATING</a> )	75
FIGURA 28 – BANHO DE GALVANIZAÇÃO, RETIRADA DAS PEÇAS ( <a href="http://LAGALVANISATION.COM/">LAGALVANISATION.COM/</a> )	75
FIGURA 29 – EXEMPLO DE UMA CAMADA DE REVESTIMENTO PVD (TEANDM)	77
FIGURA 30 – APLICAÇÃO PVD DE CRÓMIO(A), E DE TITÂNIO (B) EM COMPONENTES	77
FIGURA 31 – EXEMPLO DA APLICAÇÃO DE AÇO INOXIDÁVEL NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA ( <a href="http://PETROSTEEL.CA/APPLICATIONS">PETROSTEEL.CA/APPLICATIONS</a> )	79
FIGURA 32 – EXEMPLO DA APLICAÇÃO DA CHAVETA NUM VEIO ( CRANFORD- ENGINEERING.CO.UK/GALLERY)	81
FIGURA 33 – ROLAMENTO DE ESFERAS SEM AS CEDAÇÕES ( SHAEFFLER)	82
FIGURA 34 – ROLAMENTO DE ROLOS EM CORTE, PROPOSTO PARA APLICAÇÃO NO PROTÓTIPO (SHAEFFLER)	83
FIGURA 35 – VISTA DA CALHA EM CORTE (A) E FRONTAL (B)	84
FIGURA 36 – DEMONSTRAÇÃO DA INCLUSÃO DE RETENTORES V-RING EM DIFERENTES POSIÇÕES (SKF VEDANTES)	85
FIGURA 37 – FITAS HESKINS, PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO GALVÂNICA (HESKINS)	87
FIGURA 38 – PROPOSTAS DE MELHORIA DO PEDESTAL: A) PEDESTAL ANTIGO COM ESQUELETO INTERNO; B) NOVO PEDESTAL COM ESQUELETO INTERNO E LARGURA DO PRATO SUPERIOR; C) NOVO PEDESTAL COM LARGURA IGUAL AO DA CAIXA DO MECANISMO	89
FIGURA 39 – GRÁFICOS COMPARATIVOS ENTRE OS PERFIS PULTRUDIDOS E OUTRO TIPO DE MATERIAIS FERROSOS E NÃO FERROSOS (ALTO PERFIS PULTRUDIDOS, LDA.)	91
FIGURA 40 - VEDANTE <i>V-RING</i> A APLICAR NA NOVA CHUMACEIRA (SKF)	99
FIGURA 41 – A) SIMULAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS DO ANTIGO PEDESTAL, B) SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS DA SOLUÇÃO ESCOLHIDA PARA O PEDESTAL, C) SOLUÇÃO ESCOLHIDA INSERIDA NO CONJUNTO COM O MECANISMO	100
FIGURA 42 - EXEMPLO DE UM DOS MOTORES DE INDUÇÃO DA GROSSCHOPP (ARQUIVO GROSSCHOPP)	102
FIGURA 43 - IMAGEM DO ACOPLAMENTO POR CHAVETA	107
FIGURA 44 – COMPARAÇÃO ENTRE O NOVO VEIO EM AISI 316 E O ANTIGO, APÓS RETIRADA DO TERRENO	109
FIGURA 45 – SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO VEIO AO EFEITO DE CORTE PROVOCADO PELO PESO DA BARREIRA, AO LONGO DO SEU COMPRIMENTO.	111
FIGURA 46 – SIMULAÇÃO DO DESVIO DO VEIO PROVOCADO PELO PESO DA BARREIRA	111
FIGURA 47 - SIMULAÇÃO DA FLEXÃO AO LONGO DO COMPRIMENTO DO VEIO PROVOCADA PELO PESO DA BARREIRA	112
FIGURA 48 - SIMULAÇÃO DA TENSÃO DE TORÇÃO AO LONGO DO COMPRIMENTO DO VEIO PROVOCADA PELO PESO DA BARREIRA	112
FIGURA 49 – SIMULAÇÃO DA TENSÃO REDUZIDA	113
FIGURA 50 – SIMULAÇÃO DO CÁLCULO PARA O DIÂMETRO IDEAL DO VEIO, AO LONGO DO COMPRIMENTO DO VEIO	113

---

FIGURA 51 – ESQUEMA DA ESTRUTURA DA “NOVA” CHUMACEIRA EM CORTE (A), E EM VISTA EXPLODIDA (B)	118
FIGURA 52 – (A) ANTIGO PEDESTAL EM COMPARAÇÃO O NOVO (B); O NOVO PEDESTAL EM CONJUNTO COM O MECANISMO E HASTE DE ALUMINIO (B)	120
FIGURA 53 – SIMULAÇÃO DE E.F. DA BARREIRA COM OS ESFORÇOS DO PESO PRÓPRIO E VENTO LATERAL	121



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - PASSOS PARA REALIZAR UMA ANÁLISE FMEA (GUIA PARA A FIABILIDADE, DEPARTAMENTO DA DEFESA DOS ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA).....	47
TABELA 2 - DIVISÃO DAS RESPONSABILIDADES EM CADA FASE DO PROJETO (NORMA NP EN 12973 - 2003).....	50
TABELA 3 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO MOTOR UTILIZADO.....	57
TABELA 4 – DIMENSÕES DAS ENGENHAGENS DO REDUTOR .....	59
TABELA 5 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA: 20 MNCR 5 (% EM PESO) .....	59
TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL CONSTITUINTE DO VEIO.....	60
TABELA 7 - CARACTERÍSTICAS DO ELÉTRODO REVESTIDO USADO PARA SOLDAR O DENTADO AO VEIO ..	61
TABELA 8 – ANÁLISE SWOT AO SERVO REDUTOR .....	68
TABELA 9 - ANÁLISE SWOT AO MOTOR DE PASSO.....	68
TABELA 10 - ANÁLISE SWOT AO MOTOR HIDRÁULICO .....	69
TABELA 11 - ANÁLISE SWOT AO MOTORREDUTOR.....	69
TABELA 12 - ANÁLISE SWOT AO MOTOR ELÉTRICO DE ÍMANES PERMANENTES.....	69
TABELA 13 - ANÁLISE SWOT AO MOTOR SEM ESCOVAS.....	70
TABELA 14 – SOLUÇÃO 1 PARA O REDUTOR COM A ALTERAÇÃO DO MÓDULO.....	71
TABELA 15 - SOLUÇÃO 2 PARA O REDUTOR COM A ALTERAÇÃO DOS MÓDULOS.....	71
TABELA 16 - SOLUÇÃO 3 PARA O REDUTOR COM A ALTERAÇÃO DO DENTADO DO VEIO.....	72
TABELA 17 - ANÁLISE SWOT REDUTOR NORMALIZADO.....	73
TABELA 18 - ANÁLISE SWOT ENGENHAGENS NORMALIZADAS .....	73
TABELA 19 - ANÁLISE SWOT DO PROCESSO DE BANHO DE NIQUELAGEM .....	79
TABELA 20 - ANÁLISE SWOT DO PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO A QUENTE .....	79
TABELA 21 - ANÁLISE SWOT DO PROCESSO DE OXIDAÇÃO A NEGRO.....	80
TABELA 22 - ANÁLISE SWOT DO PROCESSO PVD .....	80
TABELA 23 - ANÁLISE SWOT DA APLICAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL.....	80
TABELA 24 - ANÁLISE SWOT DO PROCESSO CHAVETA .....	81
TABELA 25 - ANÁLISE SWOT DA APLICAÇÃO DE ROLAMENTOS DE ESFERAS.....	83
TABELA 26 - ANÁLISE SWOT DA APLICAÇÃO DE ROLAMENTOS DE ROLOS.....	83
TABELA 27 - ANÁLISE SWOT DA APLICAÇÃO DE UMA CALHA NA CHUMACEIRA .....	85
TABELA 28 – ANÁLISE SWOT DA APLICAÇÃO DE VEDANTES NA CHUMACEIRA .....	86
TABELA 29 – ANÁLISE SWOT DA PROPOSTA 1 PARA O PEDESTAL .....	89
TABELA 30 – ANÁLISE SWOT DA PROPOSTA 2 PARA O PEDESTAL .....	89
TABELA 31 – ANÁLISE SWOT DA PROPOSTA 3 PARA O PEDESTAL .....	90
TABELA 32 - DADOS PARA O ESTUDO DA HASTE QUADRADA EM PERFIL PULTRUDIDO .....	91
TABELA 33 – DADOS PARA O ESTUDO DE UMA HASTE EM Y EM PERFIL PULTRUDIDO .....	92
TABELA 34 - ESTUDO DA HASTE CILÍNDRICA NO SISTEMA DE PN .....	93
TABELA 35 - TABELA DE CARACTERÍSTICAS DO MOTOR .....	94
TABELA 36 – CARACTERÍSTICAS DA SOLUÇÃO ESCOLHIDA PARA O REDUTOR .....	95
TABELA 37 – CARACTERÍSTICAS DA SOLUÇÃO ELIMINADA .....	96

TABELA 38 – CARACTERÍSTICAS DA SOLUÇÃO ELIMINADA .....	96
TABELA 39 – PREÇOS DE VÁRIOS TIPOS DE AÇO INOXIDÁVEL .....	97
TABELA 40 – COMPARAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% EM PESO) ENTRE OS AÇOS AISI 304 E AISI 316 .....	98
TABELA 41 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO ROLAMENTO INA 6209 (FONTE INA) .....	98
TABELA 42 – COMPARAÇÃO ENTRE O PERFIL PULTRUDIDO EM PLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO E O PERFIL DE ALUMÍNIO.....	101
TABELA 43 – CARACTERÍSTICAS DA SOLUÇÃO ESCOLHIDA .....	103
TABELA 44 - CÁLCULO DA FORÇA TANGENCIAL NOS DIFERENTES DENTADOS.....	103
TABELA 45 - DADOS PARA O CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE LEWIS PARA O DENTADO DO VEIO.....	104
TABELA 46 - TAXA DE FALHAS DAS ENGRELAGENS POR HORA DE OPERAÇÃO .....	105
TABELA 47 - ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA DO REDUTOR .....	105
TABELA 48 - DADOS PARA O CÁLCULO DA CHAVETA .....	107
TABELA 49 - ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA DA CHAVETA.....	108
TABELA 50 - DADOS PARA O CÁLCULO DA FADIGA NO VEIO .....	110
TABELA 51 - DADOS PARA O CÁLCULO DA VELOCIDADE CRÍTICA DO VEIO .....	114
TABELA 52 - ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA DO VEIO.....	115
TABELA 53 - TABELA DE DADOS PARA AO CÁLCULO DA FIABILIDADE DOS ROLAMENTOS.....	116
TABELA 54 - ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA DOS ROLAMENTOS .....	116
TABELA 55 - MODOS DE FALHA DOS ELEMENTOS DE RETENÇÃO.....	118
TABELA 56 - ORÇAMENTO DOS COMPONENTES.....	122

# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	Enquadramento.....	31
1.2	Objetivos.....	31
1.3	Metodologia .....	32
1.4	Estrutura.....	32
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1	História da Ferrovia .....	35
2.1.1	Ferrovia em Portugal .....	36
2.2	Evolução da Segurança na Ferrovia (Sistemas de Segurança) .....	36
2.3	Fiabilidade .....	39
2.3.1	Falha .....	40
2.3.2	Taxa de falha .....	40
2.3.3	Sistemas não reparáveis.....	42
2.3.4	Sistemas reparáveis.....	44
2.4	Fiabilidade de sistemas .....	44
2.4.1	Redundância.....	44
2.5	Análise do modo e efeito de falha (FMEA).....	46
2.5.1	Aplicação da análise FMEA.....	47
2.6	Análise do valor .....	47
2.6.1	Conceito de valor.....	48
2.6.2	Onde se aplica a AV? .....	48
2.7	Método da AV.....	49
2.8	Plano de Trabalho.....	50
2.8.1	Análise funcional (AF).....	50
2.8.2	Diagrama de Análise Funcional .....	51
2.8.3	Criatividade .....	51
2.8.4	Fase de avaliação.....	52
2.8.5	Fase de desenvolvimento.....	52
2.8.6	Fase de apresentação.....	52

3	DESENVOLVIMENTO	55
3.1	Caracterização da EFACEC – Engenharia e Sistemas	55
3.1.1	Divisão dos transportes	55
3.2	Contextualização do problema	55
3.2.1	Conjunto do mecanismo	56
3.2.2	Pedestal	62
3.2.3	Barreira	62
3.2.4	<i>Benchmarking</i> da Concorrência	63
3.2.5	Bloco do mecanismo	63
3.2.6	Pedestal	64
3.2.7	Barreira	65
3.3	Anteprojeto /Tempestade de ideias	65
3.3.1	Bloco do mecanismo	65
3.3.2	Solução para resolver os problemas do veio com dentado (Problema 3)	73
3.3.3	Solução para o acoplamento dentado do veio	80
3.3.4	Solução para resolver o problema dos rolamentos	81
3.3.5	Solução para resolver o problema da Chumaceira	84
3.3.6	Problemas de corrosão (problema 4)	86
3.3.7	Pedestal	87
3.3.8	Barreira	90
3.4	Seleção das vias mais indicadas para resolver os problemas	93
3.4.1	Solução escolhida para o bloco	93
3.4.2	Solução escolhida para o motor	93
3.4.3	Solução escolhida para o redutor	94
3.4.4	Solução escolhida para o veio	97
3.4.5	Solução escolhida para os Rolamentos	98
3.4.6	Solução escolhida para a infiltração de água	99
3.4.7	Solução da escolha para o pedestal	100
3.4.8	Solução da escolha para a haste	100
3.5	Projeto	101
3.5.1	Motor	101
3.5.2	Redutor problema 3	102
3.5.3	Solução	102
3.5.4	Dimensionamento	102
3.5.5	Proteção da superfície	104
3.5.6	Estudo de fiabilidade	105
3.5.7	Análise FMEA do componente	105
3.5.8	Chaveta	106
3.5.9	Veio (problema 5)	109
3.5.10	Rolamentos (problema 6)	115

---

3.5.11	Pedestal (problema 8) .....	120
3.5.12	Barreira .....	120
<b>3.6</b>	<b>Orçamentação .....</b>	<b>121</b>
3.6.1	Estudo do custo .....	121
<b>3.7</b>	<b>Análise económica e retorno financeiro .....</b>	<b>125</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>129</b>
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO</b>	<b>133</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>133</b>



# INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

1.2 OBJETIVOS

1.3 METODOLOGIA

1.4 ESTRUTURA



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

O comboio é um meio de transporte rápido e seguro. No entanto, devido à sua rapidez e grande massa, os comboios modernos têm distâncias de travagem maiores, e por isso maior dificuldade em travar em segurança, em caso de emergência. Devido a estes motivos, os comboios não param nas passagens de nível, confiando que a linha estará desimpedida, quando se der a passagem.

O desimpedimento das zonas de passagem de nível é feito através de sistemas ativos (barreira, lanternas e sinal sonoro), que bloqueiam a passagem de veículos e pessoas. Com a inclusão da automação nestes sistemas, o erro humano pelo lado da segurança foi reduzido. Apesar da anulação deste fator com a automatização, este tipo de sistemas mantém um modo de falha segura, que em caso de falha, fecha a barreira, impedindo a passagem para a linha de veículos e pessoas. De forma a garantir este tipo de mecanismo de falha, os responsáveis da segurança do meio ferroviário procuram soluções com elevada maturidade de aplicação, onde são conhecidos os modos de falha. Os sistemas de passagem de nível têm uma elevada vida útil, aproximadamente trinta anos. No fim da sua vida útil, como os componentes instalados inicialmente já tem alguma maturidade, estes encontram-se em fase de degradação, o que causa muitas pequenas falhas, e que pode causar uma eventual falha grave.

Cumprir com os requisitos de segurança é, por si só, o requisito mais importante em todo o meio ferroviário.

## 1.2 Objetivos

O objetivo deste projeto é aplicar a metodologia de análise de valor aos mecanismos de barreira para aplicações ferroviárias fabricados pela EFACEC. Esta metodologia irá permitir identificar quais os componentes críticos, tanto no que respeita ao seu valor no mecanismo, como quanto à sua obsolescência. Com base nesta análise, deverá ser realizada a definição das novas soluções a utilizar, com o objetivo de trazer o mecanismo de barreira para o estado da arte deste tipo de soluções. Consequentemente, o objetivo do projeto é:

- Análise dos componentes críticos, com base no anteriormente descrito;
- Identificação das possíveis soluções alternativas, tanto disponíveis no mercado como a fabricar;
- Participação no processo de seleção dessas mesmas alternativas;
- Elaboração do projeto mecânico do novo sistema, utilizando os componentes selecionados;
- Acompanhamento da construção de um protótipo, baseado no projeto elaborado.

### 1.3 Metodologia

Com vista à prossecução do objetivo atrás enumerado, foi estabelecida a seguinte estratégia para a abordagem do problema:

- Estudo dos sistemas existentes;
- Análise funcional do atual sistema;
- Desenvolvimento do Mecanismo;
- Desenvolvimento do Pedestal;
- Desenvolvimento da Haste;
- Apresentação das soluções para a validação da empresa;
- Desenvolvimento da análise FMEA;
- Construção de um protótipo para a validação prática das soluções;

### 1.4 Estrutura

A organização desta dissertação está elaborada da seguinte forma:

- Introdução, que pretende integrar o leitor no tema deste trabalho;
- Revisão Bibliográfica, que procura fazer uma resenha teórica sobre a Ferrovia, a evolução dos sistemas de segurança, assim como dos conceitos de Fiabilidade e Análise de Valor (AV);
- Desenvolvimento, onde é explicado o progresso realizado, com o grau de pormenor necessário para qualquer leitor interessado nesta matéria;
- Conclusões, onde é apresentada uma resenha das mais-valias deste estudo.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRIA DA FERROVIA

2.2 EVOLUÇÃO DA SEGURANÇA NA FERROVIA (SISTEMAS DE SEGURANÇA)

2.3 FIABILIDADE

2.4 CARACTERÍSTICAS DA FIABILIDADE

2.5 FIABILIDADE DE SISTEMAS

2.6 ANÁLISE DE MODO E EFEITO DE FALHA (FMEA)

2.7 ANÁLISE DO VALOR

2.8 MÉTODO DA AV

2.9 PLANO DE TRABALHO



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 História da Ferrovia

A ferrovia teve um importante papel no desenvolvimento industrial e na evolução da mobilidade do ser humano, pela maneira como é realizado o transporte de mercadorias e pessoas entre localidades distantes. Este efeito fez-se sentir com mais relevo após a revolução industrial em Inglaterra, onde sistemas de transporte férreo rudimentares (Figura 1) começaram a ser utilizados para melhorar o transporte de mercadorias [1].



Figura 1 – Um dos primeiros comboios em Inglaterra ([historyofliverpool.com/liverpool\\_railway\\_history/](http://historyofliverpool.com/liverpool_railway_history/))

Os primeiros caminhos-de-transporte surgiram nos séculos XVII e XVIII, construídos em madeira e com vagões movidos a tração animal. Estes sistemas eram principalmente utilizados em minas e pedreiras. À medida que o peso dos bens a serem transportados foi aumentando, este tipo de transporte foi ficando obsoleto, sendo necessário algo com mais poder de tração e que conseguisse transportar mercadorias mais pesadas. Nos séculos XVIII e XIX, começaram a ser utilizados carris de ferro, o que permitiu diminuir o desgaste das vias de transporte e, mais tarde, com a introdução das locomotivas a vapor, no início do século XIX, os carris de ferro evoluíram para carris de aço. Este tipo de carril possuía resistência suficiente para poder suportar cargas elevadas, transmitindo de modo seguro o peso para o solo [1].

O fim da era do vapor no meio ferroviário deu-se com a introdução de motores a Diesel após a II guerra mundial. Este tipo de motor veio trazer ao transporte ferroviário mais velocidade, fiabilidade e maior facilidade de manutenção. Com a evolução dos sistemas de tração, os motores a Diesel começaram a ser utilizados combinados com elétricos. A evolução dos caminhos-de-ferro teve uma grande influência no desenvolvimento industrial, económico e social. Nos dias de hoje, o comboio representa um meio de transporte fundamental para as grandes cidades,

transportando milhões de pessoas por dia. Na área industrial, o caminho-de-ferro significa um modo mais rápido e barato de transportar mercadorias de grande peso, Figura 2, através de cidades, países e continentes [1].



Figura 2 - Transporte Ferroviário de mercadorias da CP Carga, usado para exportação de bens (hiveminer.com/tag/transportedecontentores).

### 2.1.1 Ferrovia em Portugal

A introdução da ferrovia em Portugal começou a ser defendida após *Stephenson* construir a primeira linha no Reino Unido, e era vista como uma infraestrutura que visava modernizar o País [2]. Em 1856 é inaugurada a primeira linha ferroviária em Portugal, que ligava Lisboa ao Carregado. Desde essa altura até aos dias de hoje, a Rede Ferroviária Nacional foi crescendo, ligando o país, e com a entrada de Portugal na União Europeia, as infraestruturas ferroviárias foram modernizadas e as linhas principais eletrificadas. Com estas modernizações, a Rede Ferroviária Nacional, para além de transportar milhares de pessoas nas zonas metropolitanas de Portugal, quer em transportes urbanos ou de alta velocidade (Alfa Pendular), também permite o transporte de mercadorias para Espanha, reduzindo os custos e tempo de viagem de bens exportados [3].

## 2.2 Evolução da Segurança na Ferrovia (Sistemas de Segurança)

O caminho-de-ferro é um meio de transporte que se diferencia pelas infraestruturas necessárias para o seu funcionamento, sendo também imune aos congestionamentos que afetam diariamente os meios de transportes urbanos. Apesar da segregação que este meio de transporte tem relativamente a outros, existem pontos onde as vias

rodoviárias intercetam as ferroviárias, passagens de nível (PN). Nestas zonas, Figura 3, a preocupação com a segurança tem crescido ao longo dos anos, em função do número de acidentes e sua prevenção [4]. As PN tornaram-se comuns a partir de 1930 com o desenvolvimento da rede ferroviária, e rapidamente foram consideradas uma potencial fonte de perigo. Pela sua maior velocidade e peso, os comboios a vapor consistiam num perigo maior que os vagões com tração animal, devido à sua maior distância de travagem [5].



Figura 3 – Exemplo de uma passagem de nível da EFACEC (arquivo EFACEC).

Os acidentes em PN's representam quase metade dos acidentes catastróficos ferroviários nos caminhos-de-ferro da Grã-Bretanha [6], e em 2015, na Bélgica, 86% dos acidentes foram causados por negligência, devido a pessoas que forçam a passagem através da barreira [7]. As PN's são uma componente crítica da infraestrutura ferroviária, onde existe um risco efetivo de colisão entre o comboio e o utilizador da estrada (Figura 4) [7, 8].

Embora existam vários sistemas técnicos para eliminar essas preocupações, mesmo depois de fornecer dispositivos de proteção, permanece um risco residual que precisa ser resolvido: a melhoria da segurança de cruzamento de nível é um foco importante para a indústria [10]. Em vinte e oito Estados-Membros da UE, existiam 114.580 passagens de nível em 2014, mas este número registou uma ligeira diminuição de cerca de 4% ao ano nos últimos cinco anos em toda a Europa [8].



Figura 4 – Acidente entre um veículo e um Alfa Pendular numa passagem de nível (Jornal de Notícias, 1 de Fevereiro de 2013)

A concorrência global obriga a indústria a fabricar produtos com cada vez mais qualidade, segurança e confiabilidade [7, 8]. A fiabilidade tornou-se um fator chave, devido à dependência do bom funcionamento dos sistemas, como computadores, carros, comboios, aviões, satélites, etc. [10, 11], onde geralmente a confiabilidade necessária é avaliada desde o início do projeto, tendo em conta as condições de funcionamento do produto [9, 12]. No ambiente ferroviário, a fiabilidade é um fator importante para garantir a segurança de vidas humanas. A falha do equipamento pode variar entre, defeitos de componentes menores, até falhas mais graves, causadas por cortes de energia e falhas técnicas. A falha no equipamento é também causada por vandalismo, acidentes rodoviários e pelas condições meteorológicas (particularmente vento, inundações e relâmpagos) [10]. A falha do equipamento representa um risco, que deve ser reduzido através do projeto de equipamentos "à prova de falhas" [14].

O modo de "falha segura" deve ser sempre assegurado em todos os componentes, evitando falhas críticas no sistema [9, 14, 15]. Desde o incidente de Hixon em 1968, os sistemas de PN sofrem novas funcionalidades destinadas a aumentar a segurança, tais como sistemas de videovigilância (CCTV), telefones, piso de borracha para aumentar a aderência dos veículos e pontes para pedestres [1, 7, 16]. Após essa implementação, gradualmente o caminho foi aberto para a implementação de componentes eletrónicos, como por exemplo, conta - eixos e sensores de roda. Porque o sistema é dependente do bom desempenho destes componentes (Figura 5), é necessário

garantir que têm boa confiabilidade e capacidade de dar uma boa resposta em caso de falha. A falha deve ser uma falha segura, a fim de evitar a inoperação do sistema, o que pode resultar em perda de vidas [7, 9, 12].



Figura 5 – Conta - eixos para a deteção de comboios, os quais contam o número de eixos que entram e saem da zona da PN (railengineer.uk).

### 2.3 Fiabilidade

A competição global força a indústria a fabricar produtos com cada vez mais qualidade, segurança e fiabilidade. Nos dias de hoje, a segurança tornou-se um fator chave, devido à dependência do bom funcionamento de sistemas como computadores, automóveis, comboios, aviões, satélites, etc., onde normalmente a fiabilidade requerida é avaliada desde o início do projeto, tendo em conta as condições em que o produto vai operar, obrigando o processo de projeto a respeitar satisfatoriamente todos os requisitos de fiabilidade [14]. O objetivo da fiabilidade é desenvolver métodos e ferramentas para avaliar e demonstrar a fiabilidade, manutibilidade, disponibilidade e segurança dos componentes de um produto, equipamento ou mecanismo, assim como, o apoio aos engenheiros de desenvolvimento e da produção na prossecução destas características.

A fiabilidade de um produto é expressa pela probabilidade do produto executar a função para a qual foi fabricado, sob condições especificadas durante um determinado período de tempo. A fiabilidade analisa a probabilidade de não existir nenhuma interrupção operacional durante esse intervalo de tempo [12]. Os especialistas de fiabilidade, qualidade e segurança, devem trabalhar em conjunto com a produção e desenvolvimento durante as fases de projeto, pois é necessária a transversalidade de conhecimentos. Este método, além de ser eficiente ao nível de tempo e custos, também se irá traduzir numa diminuição nas dificuldades durante a fase de projeto,

numa melhor fiabilidade, qualidade e segurança dos sistemas [14]. Os fatores que mais influenciam a importância da fiabilidade nos produtos incluem a pressão da opinião pública, competição, a sofisticação de produtos, o preço de compra, e os processos judiciais relacionados com a fiabilidade / qualidade de um produto e as suas consequências [12].

### 2.3.1 Conceito de falha

A falha ocorre quando um sistema interrompe a sua função específica. O tempo livre de falha é variável, dependendo do efeito que tem sobre o sistema. As falhas devem ser classificadas de acordo com o modo, causa, efeito e mecanismo:

- **Modo:** Modo de falha é a causa da falha ou uma possível maneira que um sistema pode ter para falhar, podendo referir-se como exemplo a fadiga e as fissuras em elementos mecânicos [18];
- **Causa:** A causa de falha pode ser devida à fragilidade do componente, erros de projeto, produção, ou problemas de fiabilidade e qualidade, que são considerados como defeitos. Os defeitos estão presentes desde o período de infância de cada componente, mesmo que não sejam descobertos neste intervalo de tempo, enquanto as falhas aparecem sempre com o tempo [18];
- **Efeito:** O efeito de uma falha difere consoante o componente e a sua função num sistema. A classificação de falhas em componentes pode ser considerada: não relevante, parcial, completa e crítica. Como as falhas podem dar origem a mais falhas, também são catalogadas de primárias e secundárias [18];
- **Mecanismo de falha:** pode ser um processo físico, químico, ou outro, do qual resulta a falha. As falhas também podem ser classificadas como repentinas ou graduais. As falhas repentinas são categorizadas como falhas catastróficas para os sistemas, contudo as falhas graduais são normalmente consideradas como falhas de desgaste [18].

### 2.3.2 Taxa de falha

A taxa de falha é uma importante característica da fiabilidade,  $\lambda(t)$ , a qual expressa a probabilidade da falha ocorrer durante uma unidade de tempo (Figura 6) e ao contrário da probabilidade, a taxa de falha é dimensional, por exemplo:  $t^{-1}$ ,  $h^{-1}$ , ou % por hora. Cada produto ou aplicação terá uma taxa de falha com as respetivas características. A Figura 6 demonstra diferentes funções de taxa de falha que usam diferentes modelos de distribuição [14], [19]:

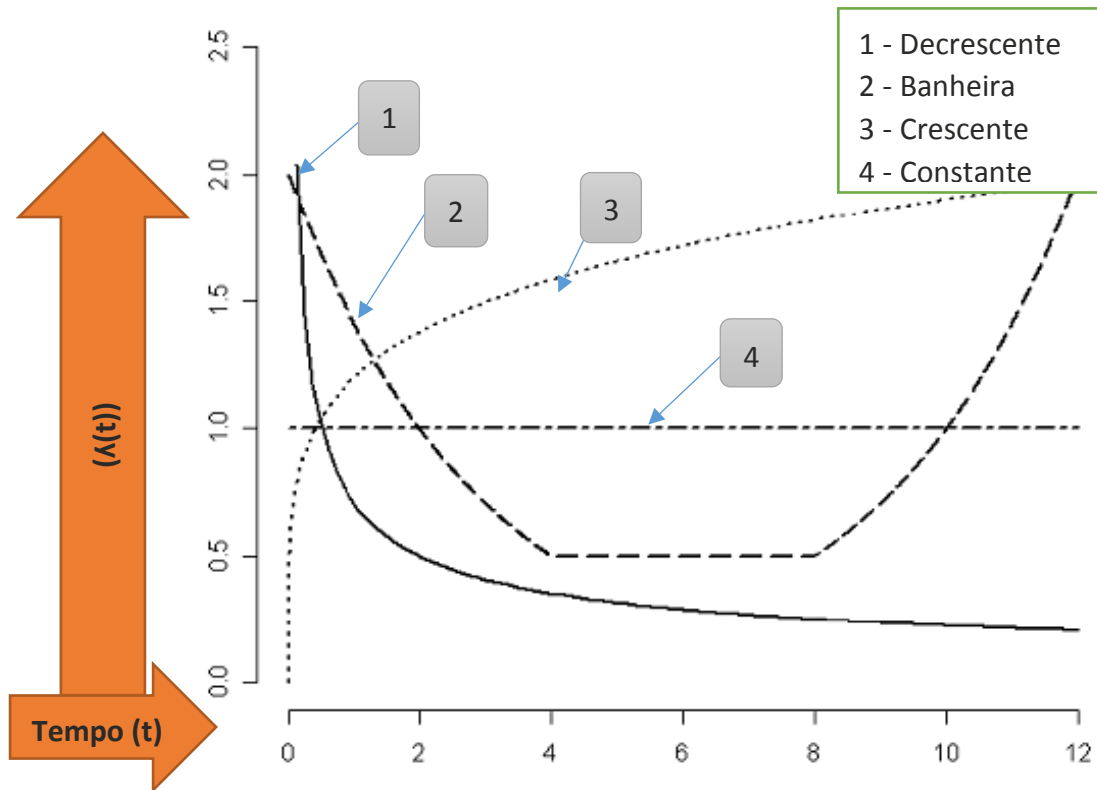


Figura 6 - Diferentes tipos de comportamento da taxa de falhas de um componente em função do tempo (Portal Action).

### 2.3.2.1 Função de taxa de falha decrescente

Esta função (Curva 1, Figura 6) demonstra falhas com maior probabilidade de ocorrer no início da vida de um componente ou produto. Este fenómeno pode ocorrer num mecanismo em fase de testes, erros num *software* recente, etc. Após a fase de início de vida, a probabilidade de falha vai gradualmente sendo reduzida. Para o cálculo deste tipo de função é utilizada a distribuição de Weibull [13].

### 2.3.2.2 Função de taxa de falha crescente

Esta função (Curva 3, Figura 6) indica os componentes com maior probabilidade de falhar ao longo do tempo. Os componentes que sofrem desgaste por fadiga podem ser analisados através desta função, utilizando a distribuição de Weibull. Os testes de desgaste podem ser simulados até ocorrer uma falha, sendo posteriormente registado o tempo até a falha ocorrer [13].

### 2.3.2.3 *Função de taxa de falha constante*

A taxa de falha constante (Curva 4, Figura 6) demonstra que a ocorrência de falhas se mantém com a mesma probabilidade durante toda a vida útil do produto. Este gráfico indica baixo risco de falha. Essa função pode ser modelada usando-se a distribuição exponencial [13].

### 2.3.2.4 *Curva da banheira ou de mortalidade*

A curva de mortalidade (Curva 2, Figura 6), mais conhecida por curva da banheira, representa o comportamento de falha de vários produtos de engenharia, ao longo do tempo. O gráfico (Figura 6) mostra três regiões identificadas como Infância (0 a 4), Maturidade (4 a 8), Velhice (8 a 12) [12]. No período de infância, todos os elementos são novos, logo apresentam taxa de falhas elevada devido há existência de defeitos de projeto, fabrico, mau manuseamento e instalação incorreta. Ao longo do tempo, estes defeitos vão diminuindo, seja por alterações ao projeto, ou por um processo de fabrico mais aprimorado. Para minimizar este efeito, o produto deve ser sujeito a um período de testes em condições de serviço [14]. No período de maturidade ou vida útil, a taxa de falhas estabiliza num valor quase constante. É a parte significativa da vida de um produto ou sistema, onde as falhas ocorrem de forma aleatória. Essas falhas podem ocorrer devido a pequenos defeitos no fabrico ou na montagem, devido a solicitações de operação superiores às projetadas, e devido ao erro humano [12]. No período de degradação, fim de vida ou velhice, a taxa de falhas aumenta devido a deterioração dos componentes de um produto ou sistema, provocados por fadiga, desgaste dos materiais e/ou corrosão [13].

### 2.3.3 *Sistemas não reparáveis*

Um sistema é considerado não reparável se após a ocorrência da falha não for possível restabelecer o seu normal funcionamento, ou se é um sistema composto por um só elemento. É possível expressar o número de elementos que falham em função do tempo por  $nf(t)$ , ou através da monitorização do número de elementos falhados por número de elementos ( $nf(t)/n$ ). Com estas funções é, possível obter: probabilidade de falha durante o intervalo de tempo  $[0;t]$ :

$$F(t) = \int f(t)dt \approx \frac{nf(t)}{n} \quad (1)$$

A função  $F(t)$  é a distribuição da função tempo para a falha (função falha). A função fiabilidade tem o comportamento contrário à função falha (Figura 7).

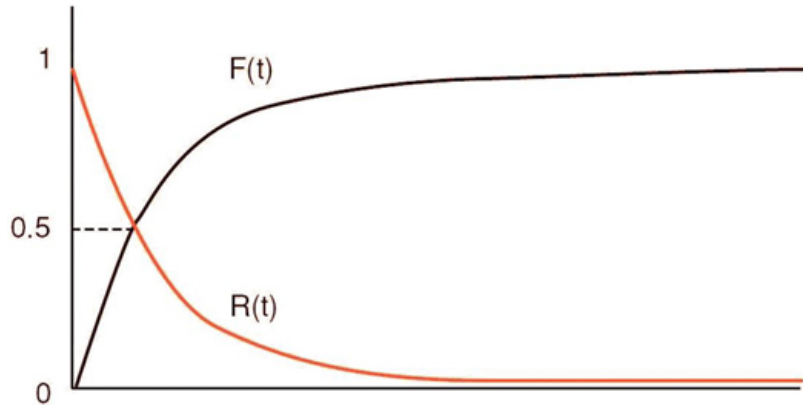


Figura 7 - Relação da Fiabilidade (R) e Falha (F), ao longo de um determinado tempo  $t$  (Digiket.BD)

A probabilidade de o sistema não falhar ( $R(t)$ ), é expressa sob a forma de probabilidade de não ocorrer falha antes do tempo  $t$  [13]:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \approx [n - nf(t)]/n \quad (2)$$

$R(t)$  demonstra a perda gradual de elementos que não sofreram falha. É chamada a função Fiabilidade.  $R$  (*Reliability* - Fiabilidade) e  $F$  (*Failure* - Falha) são complementares, ou seja [13]:

$$R(t) \oplus F(t) = 1; \quad (3)$$

Densidade de probabilidade do tempo de falha  $f(t)$ , expressa a probabilidade de falha num período curto de funcionamento,  $\Delta t$ , num intervalo de tempo  $t$  [13]:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \approx \frac{nf(t - \Delta t) - nf \times t}{n\Delta t} \quad (4)$$

Outro tipo de informação útil no cálculo da fiabilidade é obtido através do cálculo do tempo médio até ocorrer a falha (*Mean Time To Failure*), ou MTTF [13].

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(x) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (5)$$

O MTTF também pode ser calculado através de registos operacionais, após a medição e registo dos tempos em que ocorreram falha.

$$MTTF = \left(\frac{1}{n}\right) \sum t; f, j \quad (6)$$

### 2.3.4 Sistemas reparáveis

Um sistema reparável é caracterizado pela ocorrência da falha não implicar o seu “Fim de Vida”, podendo o elemento avariado ser substituído ou reparado, de modo a repor as condições para o normal funcionamento do sistema, até ocorrer uma nova falha, e assim sucessivamente. Cada intervalo deve ser determinado como *up time* (*tup*) e *down time* (*t<sub>down</sub>*), para poder determinar o tempo entre falhas, ou MTBF (*Mean Time Between Failures*) e o MTTR (*Mean Time To Repair*) [13].

$$MTBF = (1/n) \sum tup, j \quad (7)$$

$$MTTR = (1/n) \sum tdown, j \quad (8)$$

## 2.4 Fiabilidade de sistemas

Os equipamentos mecânicos e eletrónicos são compostos por vários componentes e elementos. Do ponto de vista da fiabilidade, todos os elementos e componentes têm de ser avaliados individualmente, de modo a apurar o seu comportamento à falha. No caso de um avião, que é composto por vários componentes mecânicos, hidráulicos e elétricos, a probabilidade de um deles falhar e provocar a falha de todo o sistema aumenta. A fiabilidade deste tipo de sistemas depende da fiabilidade de todos os componentes individualmente, e da relação que têm com os restantes componentes presentes no sistema. Uma organização dos sistemas, em série e sistemas redundantes, pode garantir um aumento da fiabilidade do sistema.

### 2.4.1 Redundância

Durante o projeto, deve-se ter em consideração a proteção do sistema contra falhas. Este tipo de estratégia só permite a proteção contra falhas antecipadas durante a fase de projeto. O único tipo de falhas que se pode antecipar com algum grau de precisão são as falhas dos componentes de *hardware*, que podem resultar de diferentes razões, desde o envelhecimento de componentes à falha de intervenção humana [13]. A obtenção da fiabilidade, disponibilidade e segurança de um equipamento, só pode ser alcançado com a inclusão da redundância de sistemas. Diferentes tipos de sistemas eletrónicos e mecânicos apresentam entidades redundantes, aumentando a fiabilidade e a segurança com o intuito de atingir os seus objetivos [20]. A redundância de sistemas permite que o sistema continue a operar depois de ocorrer uma falha (aumentando a disponibilidade), assumindo que a funcionalidade do componente que falhar pode ser operada por outro no sistema. O projeto de um sistema redundante deve ser considerado para sistemas com operações críticas, ou em situações onde o custo/benefício é baixo. Na análise de um sistema redundante, é necessário ter em atenção as respetivas redundâncias e a identificação das causas de falha, pois uma

simples falha poderá eliminar um sistema redundante. A utilização da Análise FMEA é obrigatória nestes casos [14]. Apesar da redundância aumentar a fiabilidade e a funcionalidade de um sistema, também poderá aumentar o número de falhas pois, mais componentes serão acrescentados a um sistema [14].

#### 2.4.1.1 Redundância ativa total

O modelo de redundâncias ativas é usado em sistemas simples de redundância que consistem em dois componentes, que conseguem atingir a mesma fiabilidade, desde que pelo menos um deles se encontre em funcionamento. Os componentes A e B (Figura 8) funcionam em simultâneo. A falha de um componente não implica a falha do sistema, em contrapartida, se todos os componentes falharem, o sistema falha [13][21].



Figura 8 - Exemplo de um sistema com Redundância Ativa Total (Sandra Ramos,2016, texto de apoio à disciplina de fiabilidade e manutenção, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto).

O cálculo da fiabilidade para este tipo de redundância é:

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] = 1 - \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (9)$$

No sistema redundante, se os componentes são iguais e têm taxas de falhas constantes,  $\lambda_i = \lambda$ , então calcula-se a fiabilidade do sistema por [14], [13] e [20]:

$$R_s(t) = 1 - [1 - R(t)]^n = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n \quad (10)$$

#### 2.4.1.2 Redundância ativa parcial

No caso de um sistema com componentes em *stand by* Figura 9, é obrigatório ter em conta a fiabilidade e os modos de falha dos *switch* e dos elementos de deteção. A fiabilidade dos elementos primários e dos elementos de reserva, assim como dos elementos que alternam o funcionamento dos componentes anteriores, é necessária para o funcionamento do sistema [12, 20]. Os sistemas redundantes combinados (Figura 10), são compostos por componentes em série e em paralelo. A redundância é colocada onde existem os componentes com funções críticas com maior probabilidade de falha [14].

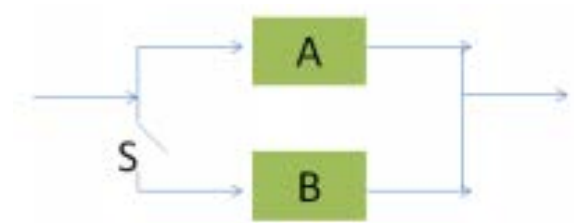


Figura 9 - Exemplo de um Sistema com Redundância Ativa Parcial (Sandra Ramos,2016, texto de apoio à disciplina de fiabilidade e manutenção, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto)

#### 2.4.1.3 *Sistemas combinados*

A redundância deve ser aplicada especificamente e quando não é possível aplicar outra solução que assegure o nível de fiabilidade necessária para as funções críticas [12],[21].

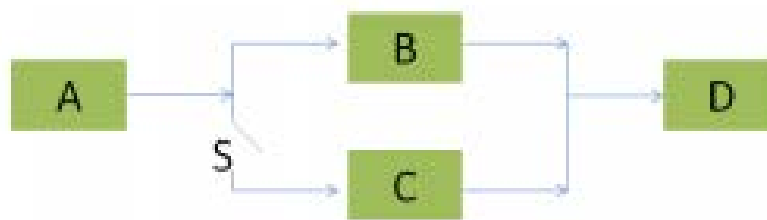


Figura 10 - Exemplo de um Sistema Combinado Sandra Ramos,2016, (texto de apoio à disciplina de fiabilidade e manutenção, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto)

### 2.5 *Análise do modo e efeito de falha (FMEA)*

A avaliação da fiabilidade é uma atividade importante para assegurar a fiabilidade e a segurança de produtos de engenharia. Este processo começa com a fase de projeto dos produtos/sistemas. A análise FMEA foi primeiramente utilizada no início dos anos cinquenta, com o desenvolvimento de sistemas de controlo de voo para a Marinha dos Estados Unidos da América. O propósito da análise FMEA consiste no estudo dos resultados ou efeitos de falha de um componente numa operação e, classificar todas as falhas potenciais consoante a sua severidade. A utilização desta análise diminui a probabilidade do produto ou processo falhar durante a sua operação. Este é o objetivo desta ferramenta que procura aumentar a fiabilidade [22].

A qualidade e a fiabilidade são cada vez mais importantes para os consumidores, pois a falha de um produto, mesmo que prontamente reparada, para além de privar do uso, também causa insatisfação. Em casos mais graves, o produto pode mesmo causar danos físicos aos utilizadores. Esta metodologia tem duas formas de aplicação, durante

o projeto do produto ou durante o processo de fabrico. Na FMEA do Produto, são consideradas as falhas que poderão ocorrer com o produto dentro das especificações do projeto. Na FMEA de Processo, o objetivo é evitar falhas do processo, tendo como base as não conformidades do produto com as especificações do projeto [20].

### 2.5.1 Aplicação da análise FMEA

A aplicação da análise FMEA visa essencialmente:

- Diminuir a probabilidade de falhas em projetos de novos produtos e processos de fabrico;
- Diminuir a probabilidade de potenciais falhas em produtos e processos já em operação;
- Aumentar a fiabilidade de produtos ou processos já operacionais, através da análise das falhas já ocorridas;
- Diminuir os riscos de erro.

Para a execução de uma análise FMEA (Tabela 1), é necessário listar e analisar todos os modos de falha de um sistema e subsistema, de modo a garantir que não existe nenhuma falha funcional que prejudique o mecanismo [13].

Tabela 1 - Passos para realizar uma análise FMEA (Guia para a Fiabilidade, Departamento da Defesa dos Estados Unidos da América).

Passos	Descrição
1º	Definir fronteiras de sistema e especificações em detalhe
2º	Listar todos os sistemas e subsistemas em detalhe
3º	Listar todos os modos de falha possíveis, a identificação e a descrição do componente em questão
4º	Listar o efeito de cada modo de falha no subsistema
5º	Atribuir uma taxa de falha ao modo de falha de cada componente
6º	Incluir observações para todos os modos de falha
7º	Rever todos os modos de falha e executar as medidas apropriadas para evitar falhas funcionais

### 2.6 Análise do valor

Análise do Valor (AV) é uma metodologia utilizada para a identificação de funções e o relacionamento com os custos para realizar cada função, visando identificar e eliminar custos desnecessários. A Engenharia de Valor (EV) começou na General Electric durante a II Guerra Mundial. Havendo escassez de matéria-prima e de componentes por esse motivo, Lawrence D. Miles, em 1942, começou por implementar uma metodologia que depois foi denominada por "*Value Analysis*"[23][24]. Esta

metodologia dá ênfase há análise das funções de um produto, projeto, processo ou serviço, visando mensurar o valor de cada função com a finalidade de desenvolver alternativas para otimizar a relação benefício x custo de cada função [25]. A AV é diferente dos outros processos de redução de custos, pois põe em causa o produto, desde o projeto, até à sua produção, baseando-se no papel que este vai cumprir e na satisfação do consumidor. As soluções técnicas de conceção do produto vão ser questionadas, quer se pretenda um produto novo, ou a reformulação de um já existente [26]. Esta técnica teve enorme sucesso, inclusivamente no Exército Americano, fazendo com que nos anos 60, qualquer fornecimento ao Departamento de Defesa Americano, tivesse que ser submetido a um estudo de análise de valor.

### 2.6.1 Conceito de valor

Um determinado consumo de recursos está associado a cada solução. Os recursos caracterizam-se pelo custo ou preço, mas podem-se aceitar outros parâmetros como o peso ou o tempo. O conceito de valor é definido pela relação entre a satisfação de uma função e os recursos consumidos para a realizar. Valor é uma relação que permite comparar soluções. Uma solução é tanto melhor quanto maior for o seu valor. A satisfação esperada das funções deve ser adequada aos recursos necessários, tendo em conta a finalidade do produto [23][26].

$$\text{Valor} = \text{Satisfação das necessidades/Recursos} \quad (11)$$

### 2.6.2 Onde se aplica a AV?

A metodologia da AV é aplicada em casos de:

- Custos elevados;
- Aplicação de novas tecnologias;
- Elevado nível de rejeições;
- Cumprimento de novas normas;
- Forte concorrência;
- Elevado número de reclamações;
- Resultados financeiros decepcionantes;
- Alterações nos hábitos de consumo.

A severidade de reformulações que o produto pode sofrer depende de vários fatores, entre eles se este se encontra em fim de vida. A AV fornece os serviços solicitados pelos clientes e pelos utilizadores, com o objetivo de otimizar os recursos dos mesmos e da empresa [24], [25].

A AV é aplicada em diferentes áreas, tais como:

- Produtos em fase de projecto;
- Produtos existentes;
- Produtos de série ou unitários;
- Processos industriais;
- Compras;
- Sistemas administrativos;
- I&D;
- Gestão.

## 2.7 Método da AV

A análise de valor é a base a partir da qual se tem desenvolvido a gestão pelo valor. Utiliza um processo de conceção funcional e económico, com o objetivo de aumentar o valor de um objeto [26]. O método consiste num plano de trabalho com as seguintes fases:

- Orientação e preparação;
- Pesquisa de informação;
- Análise funcional;
- Procura de soluções;
- Avaliação de soluções;
- Desenvolvimento das soluções aprovadas;
- Apresentação das propostas finais;
- Implementação.

Para obter sucesso em projectos e atividades de AV, os fatores humanos são uma peça fundamental neste tipo de projetos. A composição do grupo de trabalho deverá depender do objetivo da AV [25]. O grupo deverá ser constituído por uma equipa multidisciplinar que represente os vários departamentos que estão mais próximos do objeto em estudo pela AV. Alguém que esteja associado à definição das necessidades e aos objetivos, como por exemplo: Gestão de produto, Segurança, Qualidade e Compras [17]. A multidisciplinaridade de áreas permite obter um consenso acerca das funções, desempenhos, princípios, soluções e custos, favorecer a criatividade e melhorar substancialmente a informação disponível. A resolução de problemas também é facilitada, evitando que pessoas ligadas à conceção do produto estejam ligadas ao processo. Se o grupo de trabalho diversificado é o elemento essencial da AV, o animador, Eng.º José Mário Fonseca, deverá ser o guia e garante da correta aplicação do método [17].

## 2.8 Plano de Trabalho

É essencial um plano metódico de trabalho de uma AV para a compreensão mútua entre os membros da equipa [16, 17]. A Tabela 2, mostra as tarefas e as suas divisões pelos elementos ligados a uma AV.

Tabela 2 - Divisão das responsabilidades em cada fase do projeto (Norma NP EN 12973 - 2003).

Nome da fase	Nº da fase	Decisor	Animador da equipa	Equipa de trabalho	Departamentos operacionais
Fase preliminar	0	R			P
Definição do projeto	1	R	P		P
Plano de ação	2		R		
Recolha de Dados	3		R	P	P
Análise funcional	4		R	R	P
Recolha de ideias	5		R	R	P
Avaliação das soluções	6		P	P	R
Desenvolvimento das propostas	7		R	R	P
Apresentação das propostas	8	R	R	R	P
Implementação	9	R	P		R

### Legenda:

P – Participação durante as fases do plano de trabalho

R – Responsabilidades durante as fases do plano de trabalho [26].

### 2.8.1 Análise funcional (AF)

A AF é um processo que descreve as funções e as suas relações num sistema. O resultado é uma representação visual das funções caracterizadas, hierarquizadas e quantificadas. O produto é analisado como um conjunto de funções cujo desempenho depende da satisfação do consumidor, e não como um conjunto de componentes [25]. Durante esta fase, são caracterizadas, ordenadas e hierarquizadas todas as funções de um sistema. Para definir as funções, são utilizadas frases de duas palavras (ex: Mover barreira). Após este processo, a equipa analisa as funções e sugere melhorias ou alterações, de modo a seguir os objetivos do projeto [17].

### 2.8.2 Diagrama de Análise Funcional

O diagrama de análise funcional (FAST) é uma técnica que consiste na apresentação das funções relacionadas com o utilizador. É normalmente utilizado para um produto já existente ou em processo de desenvolvimento. A abordagem FAST permite ao grupo de trabalho reflexões criativas, geradas pelas dúvidas criadas durante as observações e interrogações que surgem na construção do diagrama [26].

Um diagrama FAST (Figura 11) é limitado por duas linhas verticais que representam o domínio do problema: à esquerda da linha esquerda encontra-se a função de “nível superior”, que é a necessidade geral. Da esquerda para a direita, vai-se colocando a questão: **COMO?** Da direita para a esquerda colocando a questão: **PORQUÊ?** Na posição vertical são colocadas as funções que atuam ao mesmo tempo que outras, ou que atuam sempre [26].

A pergunta “Porquê?” orienta as funções de ordem mais elevada, enquanto a pergunta “Como?” orienta as funções de ordem mais baixa, ou seja, obtemos maior detalhe. As funções identificadas são dispostas de modo a obter um esboço do diagrama, o qual é modificado até se obterem relações satisfatórias e uma sequência que represente o funcionamento do sistema. O diagrama FAST é normalmente utilizado para produtos existentes, mas também é utilizado para o desenvolvimento de novos produtos [26].

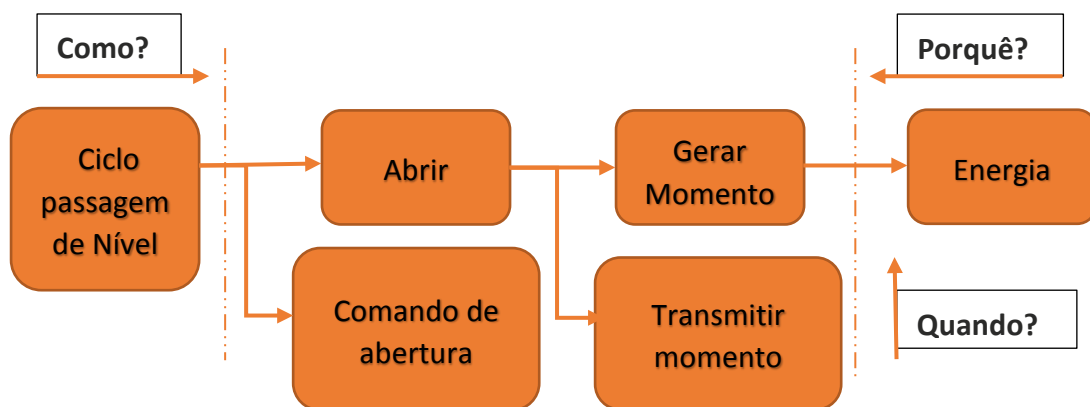


Figura 11 – Exemplo da Organização das funções num diagrama FAST

### 2.8.3 Criatividade

Nesta fase, baseando-se na definição das funções do diagrama FAST, a equipa procura alternativas para o funcionamento do sistema, de modo a que cumpra os objetivos do projeto. Por exemplo: se o produto existente usa um determinado tipo de motor, são postos em discussão todos os tipos de motor que cumpram os objetivos do projeto [25].

#### 2.8.4 Fase de avaliação

A equipa segue um processo de seleção das melhores propostas, segundo os objetivos do projeto. Nesta fase, são tidos em conta fatores como preço, fiabilidade e complexidade de funcionamento. Todas as ideias selecionadas oferecem incremento de valor, ou seja, para além de cumprirem com os requisitos do projeto, podem aumentar o seu rendimento, limitando os recursos [25].

#### 2.8.5 Fase de desenvolvimento

Após a fase de seleção, as propostas aprovadas são utilizadas no *design* do “novo” produto. A aprovação da fase de desenvolvimento está dependente da documentação necessária que justifica que as alternativas devem ser implementadas, por exemplo: cálculos, modos de falha, fiabilidade, relação custo x benefício, etc. [25].

#### 2.8.6 Fase de apresentação

O animador da equipa elabora um relatório ou apresentação, onde são argumentadas todas as alternativas aplicadas e desenvolvidas para o projeto, assim como o respetivo incremento de valor no produto final [25].

# DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Caracterização da EFACEC – Engenharia e Sistemas
  - 3.2 Estado da Arte
  - 3.3 Anteprojeto / Tempestade de ideias
- 3.4 Seleção das vias mais indicadas para resolver os problemas
  - 3.5 Projeto
  - 3.6 Orçamentação
  - 3.7 Análise económica e retorno financeiro



## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 Caracterização da EFACEC – Engenharia e Sistemas

A EFACEC é uma empresa Portuguesa, exportadora e com presença internacional em mais de 65 países. No final de 2014, a Efacec Power Solutions passou a constituir um grupo de empresas que reúne todos os meios de produção, tecnologias e competências técnicas e humanas para o desenvolvimento de produtos e atividades nos domínios das soluções de Energia, Engenharia, Ambiente, Transportes e Mobilidade Elétrica, abrangendo ainda uma rede de filiais, sucursais e agentes espalhados por quatro continentes.

#### 3.1.1 Divisão dos transportes

A divisão de transportes desenvolve a sua atividade nos segmentos de Ferrovias, Metros Ligeiros e Rodovias, desenvolvendo e implementando soluções em domínios tecnológicos diversificados, através de um vasto portefólio de produtos e serviços no segmento de Ferrovias e Metros Ligeiros. Tem como principais aplicações neste campo conceção, fornecimento, gestão de projeto, instalação, testes e manutenção de projetos integrados que incluem, Energia, Telecomunicações, Comando, Controlo e Sistemas de Sinalização.

### 3.2 Contextualização do problema

O ponto de partida desta análise é o mecanismo que se encontra no bloco de cada meia barreira ferroviária, Figura 12. Este sistema está em uso desde 1980 (com vida útil de 30 anos), o que implica que alguns componentes já tenham atingido o seu estado de maturidade e, alguns atingindo seu período de obsolescência. Por esta razão poderão existir, hoje soluções mais recentes que permitam a utilização de componentes e métodos de fabrico do mecanismo e meia barreira, diferentes e que envolvam menos custos.

O objetivo da análise de valor aos mecanismos de barreira para aplicações ferroviárias é identificar quais os componentes críticos, relativamente ao seu valor no mecanismo, como quanto à sua obsolescência. Nesta análise deverá ser feita a definição das novas soluções a utilizar, com o objetivo de trazer o mecanismo de barreira para o estado da arte deste tipo de soluções. A redução de custo, um dos objetivos para a elaboração deste projeto, é feita através da utilização de componentes *standard*, se possível, para que os custos dos componentes do mecanismo diminuam. Todas as sugestões feitas neste relatório têm como objetivo melhorar a eficiência do mecanismo, tentando resolver problemas de obsolescência e existentes no funcionamento do mecanismo no terreno, a infiltração de água, corrosão no veio e parafusos.

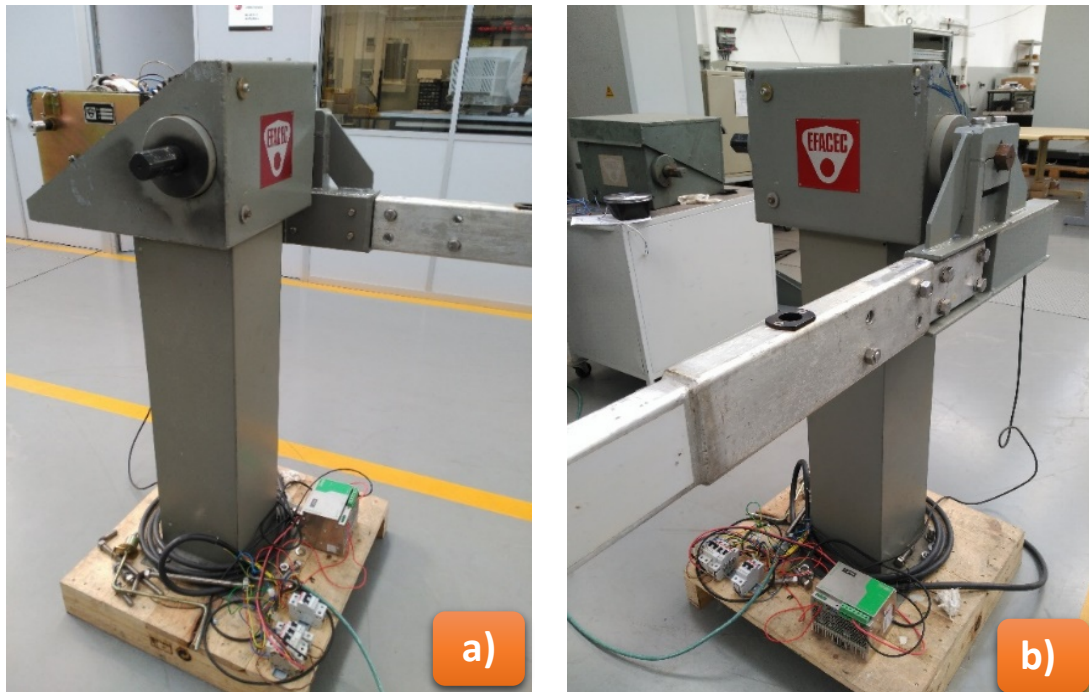


Figura 12 - Perspetiva da PN da EFACEC pelo lado contrário à barreira (a) e pelo lado da barreira (b)

### 3.2.1 Conjunto do mecanismo

O bloco protetor do mecanismo é constituído pela superfície inferior, duas chapas laterais e duas chumaceiras, unidas através do processo de soldadura TIG (*Tungsten Inert Gas*) sem material de adição, segundo informações do fornecedor. O bloco está dividido em duas partes: o bloco inferior, onde estão fixados os componentes elétricos e mecânicos e a parte superior, capota, que tem como objetivo a proteção dos componentes referenciados anteriormente. O acesso à área do mecanismo é realizado através da abertura de uma fechadura que tranca a capota. A capota foi redesenhada recentemente, ficando com uma menor espessura de chapa e com um *design* mais moderno.

A superfície inferior, segundo os dados do fornecedor, é uma peça cortada a LASER com 6 mm de espessura e posteriormente quinada para ter a forma requerida. A esta peça são soldadas as chapas laterais, através do processo TIG sem material de adição. As chapas laterais também são cortadas pelo processo de corte LASER, onde é realizado um pré-furo, de modo a posicionar os furos do veio. Após a montagem do bloco, os furos são fresados para garantir que são concêntricos, e não haver problemas na montagem final.


#### 3.2.1.1 Motor

O mecanismo de meia barreira utiliza o motor EM 120 – 45K da Grosschopp, exposto na Tabela 3 com as respectivas características, sendo utilizado desde que foi lançado no mercado, há 30 anos. Atualmente o fabricante está a produzi-lo especialmente para

a EFACEC. Como não é um produto de fabrico corrente, os custos deste componente são elevados e é necessária a sua substituição. Com uma vida útil de 30 anos sem renovação tecnológica, este produto encontra-se em estado de obsolescência em termos técnicos, tendo em conta que no mercado já não existem produtos com características equivalentes, no respeito à rotação e ao binário para a mesma corrente de alimentação. Relativamente à manutenção, neste motor são normalmente substituídas as escovas de indução de corrente ao fim de algum período de tempo. A alteração deste componente irá originar uma reorganização das engrenagens do mecanismo, de modo a obter movimento suficiente para a rotação da barreira.

Tabela 3 – Especificações técnicas do motor utilizado

Características do motor	
Tensão: 20 V DC	± 10 %
Corrente nominal	7,2 A
Binário	1,27 N·m
Rotação nominal:	600 rpm
Relação de engrenagem	316:1



### 3.2.1.2 Redutor

O redutor atual é composto por oito engrenagens (Figura 13), de modo a transformar os 1,27 N·m a saída do motor para 400 N·m no veio dentado, com uma relação de engrenagens de 1:316, que realiza a elevação da barreira. A engrenagem 1 está ligada ao motor e transmite movimento ao redutor. A engrenagem 8 está soldada ao veio e irá ser analisada mais à frente. A engrenagem 3 é acionada manualmente através de uma manivela, no caso de uma manutenção ou quando o motor se encontra danificado. O acionamento manual é um requisito de segurança. Na Tabela 4, estão catalogadas as características fundamentais de cada engrenagem.

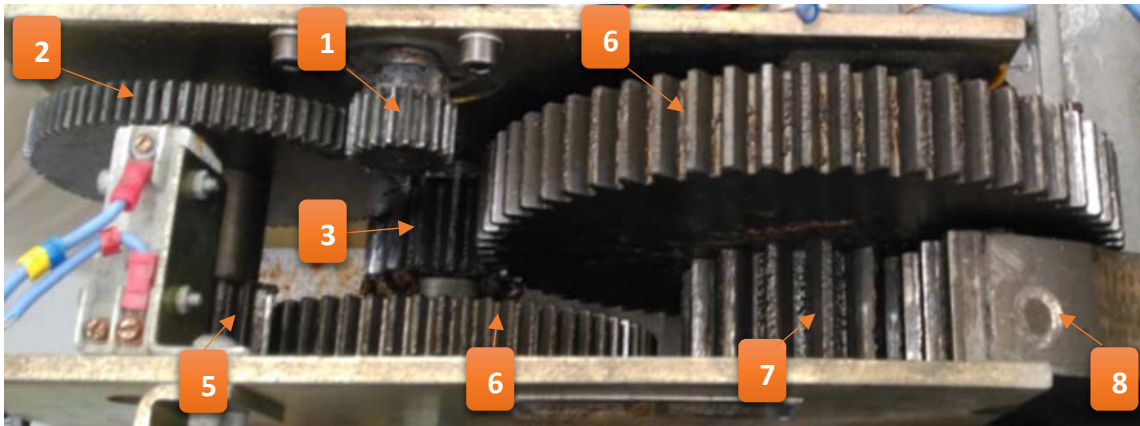


Figura 13 – Esquema da organização das engrenagens no redutor

O *microswitch*, Figura 14, desativa o travão eletromagnético e permite o acionamento manual da barreira. A existência deste modo manual é um requisito de segurança para as passagens de nível.



Figura 14 – Travão eletromagnético e eixo da manivela

Durante os 30 anos de vida útil, este componente não teve qualquer falha. Como manutenção semestral, é feita uma limpeza da massa lubrificante seca e a relubrificação, para manter o sistema convenientemente lubrificado. As dimensões das engrenagens estão descritas na tabela Tabela 4.

Tabela 4 – Dimensões das engrenagens do redutor

Engrenagem	Número de dentes (Z)	Direção do dentado	Modulo (m)	Ângulo de Pressão ( $\alpha$ )
1	20	Reto	1,25	20°
2	79	Reto	1,25	20°
3	15	Reto	2	20°
4	68	Reto	2	20°
5	15	Reto	3	20°
6	64	Reto	3	20°
7	14	Reto	4,5	20°
8	58	Reto	4,5	20°

O material das engrenagens é o aço DIN 20 MnCr 5 (Tabela 5). Este é um aço carbonitrurado, próprio para a produção de engrenagens e elementos de máquinas. A carbonitruração consiste no enriquecimento superficial da peça com carbono + azoto (0,5 - 0,7), mediante o contacto das peças com uma atmosfera controlada. Após este enriquecimento superficial, as peças são imersas rapidamente em óleo, de modo a produzir uma elevada dureza superficial (58-62 HRC), resistente ao desgaste, abaixo da qual reside um núcleo com uma dureza mais reduzida, capaz de proporcionar uma boa tenacidade da peça.

Tabela 5 - Composição química: 20 MnCr 5 (% em peso)

Elemento	Min	Max
C	0,17	0,22
Si	-	0,40
Mn	1,10	1,40
P	-	0,025
S	-	0,035
Cr	1,00	1,30

A relação de transmissão do novo redutor estará sempre relacionada com o novo motor, após a seleção do mesmo para o mecanismo, e como a probabilidade de o novo motor ser mais potente que o modelo EM 120 – 45K da Groschopp é alta, o objetivo é projetar uma nova relação de transmissão de modo a que os 400 N·m aplicados na barreira sejam transmitidos.

### 3.2.1.3 Veio principal

O material que constitui o veio principal (Figura 15), S235JR (EN 10025-2), é um dos elementos que sofre maior oxidação em todo o mecanismo.




Figura 15 – Perspetiva do veio principal e da parte superior do dentado soldado.

Este aço de construção (Tabela 6) é usado principalmente para a construção soldada. Como não contém cromo nem níquel na sua composição química, torna suscetível a oxidação da sua superfície, principalmente nas secções que estão em contacto com o ambiente envolvente.

Tabela 6 – Características do material constituinte do veio

Elemento	S235JR (C1 – F. Ramada)
C	≤ 0.16%
Si	≤ 0.35%
Mn	≤ 1.20%
S	≤ 0,025%
P	0,03%
Custo	1,20 €/kg



#### 3.2.1.4 *Acoplamento da engrenagem*

O material usado na construção do veio é o aço de baixa liga S235JR. A ligação entre o veio e o dentado reto, é feita através do processo de soldadura por eléctrodo revestido, Tabela 7. Este eléctrodo tem elevada resistência à fissuração, sendo próprio para a soldadura de aços de grão fino com elevada tensão de rotura.

Tabela 7 - Características do eletrodo revestido usado para soldar o dentado ao veio

Eurotrodo MC 40 – Electro Portugal	
$R_e$	690 N/mm <sup>2</sup>
$R_m$	760 - 960 N/mm <sup>2</sup>
$A_5$	17%

### 3.2.1.5 *Chumaceira*

Durante 30 anos cumpriram a sua função de apoiar e proteger o rolamento do exterior no mecanismo, fazendo também a proteção do lado exterior do veio. Este componente isola o rolamento e o interior da caixa das variações atmosféricas. Nos últimos anos, a chumaceira tem sofrido infiltrações, o que tem danificado rolamentos, que causam o bloqueio da barreira e provocam uma falha não segura.

Na Figura 16 podemos também observar a marca que demonstra o material oxidado devido à infiltração de água no interior da chumaceira e, conseqüentemente, nos rolamentos. A água, depois de se infiltrar por capilaridade na chumaceira, passa para os rolamentos, especialmente nas pistas dos corpos rolantes, contaminando a massa lubrificante e causando deformações a longo prazo. A situação da infiltração de água nos rolamentos será abordada mais à frente, com diversos tipos de soluções para mitigar o problema.



Figura 16 – Chumaceira, com destaque para o nível de água armazenado e seus efeitos (1)

### 3.2.2 Pedestal

O pedestal, Figura 17, é composto por duas cantoneiras de aço S235JR soldadas a TIG na vertical, e tem uma caixa de acesso aos bornes a meia altura. O pedestal é fixo a um maciço de betão, através de uma chapa de aço S235JR soldada às cantoneiras. Nestas, passam varões varões de aço roscado M20. Quando aplicadas barreiras mais pesadas, a PN apresenta problemas de torção no momento em que é dado o impacto de acionamento à barreira.



Figura 17 – Perspectiva do pedestal com caixa para Bornes

### 3.2.3 Barreira

A barreira é formada por várias secções retangulares de alumínio soldadas, Figura 18. As secções de alumínio são extrudidas com medidas que não são normalizadas, o que torna o componente realizado à medida para a EFACEC, sendo este um componente dispendioso em termos de valor, em todo o mecanismo de meia barreira.



Figura 18 - Sistema de PN, com barreira de secções retangulares de alumínio (Infraestruturas de Portugal)

### 3.2.4 *Benchmarking da Concorrência*

Este trabalho foi realizado com a colaboração de uma equipa composta de pessoas ligadas à Gestão de Produto, Segurança Funcional, Sinalização e um Engenheiro de Materiais e Processos de Fabrico, e teve como base um *benchmarking* sobre concorrentes especialistas em soluções de PN, de forma a poder analisar e viabilizar algumas das soluções aplicadas pela concorrência, nos sistemas de PN da EFACEC.

### 3.2.5 *Bloco do mecanismo*

Apesar dos diferentes *designs* da caixa do mecanismo da Alstom e da Ansaldo (Figura 19), o modo de funcionamento é equivalente, sendo observáveis diferentes opções do ponto de vista mecânico. No caso do mecanismo da Alstom, Figura 19 (a), em primeiro plano é observável a dimensão das engrenagens, o que permite uma maior desmultiplicação da velocidade do motor, com dentado de elevado módulo. No caso do mecanismo da Ansaldo, Figura 19 (b), foram observadas as engrenagens de dimensão reduzida, comparadas com o mecanismo 710B da EFACEC, e também com as do mecanismo da Alstom. Esta redução das engrenagens e seus respetivos módulos, implica um motor com pouca rotação, um engrenamento mais suave e a consequente redução do ruído de funcionamento. No mecanismo da Ansaldo, o veio também teve um fator de destaque devido aos seus tratamentos de superfície e ao seu interface com os *microswitches*.



Figura 19 – Mecanismo da Alstom (a) e Mecanismo da Ansaldo (b) (Arquivo EFACEC)

No mecanismo da Siemens Austrália, Figura 20, podemos observar que existe a aplicação de uma correia que transmite o movimento do motor até à barreira. Por ser a única solução observada deste tipo, tem relevância para este estudo de concorrência, apesar de esta ser a solução menos apelativa devido à sua complexidade, e por ser completamente diferente do atual sistema de engrenagens, o que poderia levar a um longo e complexo processo de homologação.



Figura 20 - Mecanismo Siemens Austrália (Siemens)

### 3.2.6 Pedestal

Na análise do pedestal dos diversos concorrentes, existem modelos equivalentes aos da EFACEC, mas com diferenças estruturais que podem ser implementadas no âmbito deste projeto. O mecanismo da Ansaldo, Figura 21a), é constituído por uma estrutura esguia que suporta todo o mecanismo. No pedestal utilizado no mecanismo da Sweizer, Figura 21b), é utilizada uma estrutura soldada para obter maior resistência, a qual é coberta por uma chapa protetora. Este tipo de pedestal pode ser aplicado no âmbito deste projecto, devido ao seu desenho equivalente.

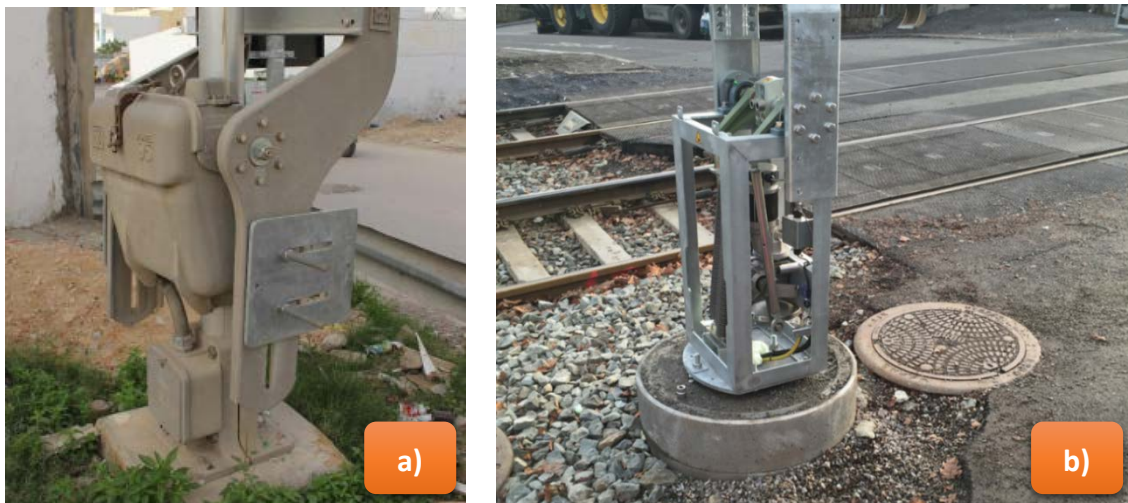


Figura 21 – Pedestal da Ansaldo (a) e Pedestal da Sweizer (b) (Arquivo EFACEC)

### 3.2.7 Barreira

No subconjunto da barreira existe a aplicação de perfis pultrudidos em sistemas de barreira. Esta aplicação foi mais recorrentemente vista em aplicações no centro da e Europa, como por exemplo Alemanha, Figura 22.

A Eurocoles, é uma empresa alemã especialista em perfis pultrudidos para aplicações em soluções de barreira. O sistema da *Siemens* Austrália também aplica este conceito de barreira em perfil pultrudido, mas para a totalidade da barreira ser fabricada neste material, o comprimento, é um dos factores a ter em conta.



Figura 22 – Sistema *Wayguard SIM 6/13*, da *Siemens*, com a barreira em perfil pultrudido (*Siemens level-crossing protection systems*)

## 3.3 Anteprojecto /Tempestade de ideias

Foi elaborado um diagrama FAST, de modo a determinar as funções (Anexo 1) da PN. Este diagrama é importante para fazer equivaler componentes com a mesma função. O objetivo final é obter um produto que execute as funções determinadas inicialmente, mas que tenha um custo/benefício melhor.

### 3.3.1 Bloco do mecanismo

O bloco do mecanismo é constituído por chapa de aço S235JR com 6 mm de espessura, sendo a chapa base quinada e posteriormente maquinada, de modo a evitar alterações no posicionamento dos furos. A esta são soldadas duas chapas laterais também com 6 mm de espessura. Nestas chapas é feito um pré-furo para posicionar a zona onde o veio vai passar e, só após a soldadura de todo o bloco, é realizada a maquiagem da zona onde as chumaceiras vão ser ligadas, para evitar diferenças de concentricidade.

### 3.3.1.1 *Solução para o motor (problema 1)*

Na pesquisa de soluções para este componente, foram abordadas diferentes alternativas de motor para aplicar no mecanismo. Foram recebidos nas instalações da EFACEC Engenharia e Sistemas, comerciais da SEW Rurodrive e Bresimar, tendo sido feito um acompanhamento na fase de seleção do motor pelo comercial da Grosschopp Americana.

### 3.3.1.2 *Motor elétrico de corrente contínua de ímanes permanentes*

Os motores de corrente contínua têm tradicionalmente grandes aplicações na indústria, sendo que são eles que permitem a variação de velocidade dos componentes. As características deste tipo de motor são: baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando, juntamente com a sua construção simples, a grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e com os melhores rendimentos.

### 3.3.1.3 *Motorreductor*

Um reductor acoplado ao motor pode ser uma hipótese, caso o *output* de binário do motor seja superior ao necessário. Uma manivela para acionamento manual, no seguimento do reductor, será necessária para acoplar engrenagens, de modo a que seja possível implementar um sistema de movimentação da barreira por manivela.

### 3.3.1.4 *Servomotores*

Os servomotores são aplicados em situações onde é necessária grande precisão no posicionamento. Este mecanismo recebe um sinal de controlo, que verifica a posição atual para controlar o seu movimento, indo para a posição desejada com velocidade controlada externamente por um dispositivo *encoder*. Ao contrário dos motores contínuos que giram indefinidamente, o eixo dos servomotores possui liberdade de apenas cerca de 180° (360° em alguns modelos), dando grande precisão aos seus movimentos.

### 3.3.1.5 *Motor de passo*

Um motor de passo é um tipo de motor elétrico usado quando é necessário um posicionamento muito preciso, sendo um concorrente direto do motor servo nas suas aplicações. Enquanto o servomotor é mais rápido, os motores de passo são mais económicos. Neste tipo de motor, a rotação é controlada por uma série de campos eletromagnéticos que são ativados e desativados eletronicamente. Os motores de passo não usam escovas ou comutadores e possuem um número fixo de pólos magnéticos que determinam o número de passos por rotação. A rotação mais comum

é 3 a 72 passos/rotação, significando que ele leva de 3 a 72 passos para completar uma volta. Para atingir todo o seu binário, as suas bobinas devem receber toda a corrente marcada durante cada passo. O controlo computadorizado de motores de passo é uma das formas mais versáteis de sistemas de posicionamento, particularmente quando digitalmente controlado como parte de um servosistema, e que pode tornar o componente mais caro que o mecanismo atual.

#### 3.3.1.6 *Motor hidráulico*

Para funcionar, o motor hidráulico, Figura 23, deve receber um fluido, que chega canalizado em tubos hidráulicos pressurizados pela bomba hidráulica, sendo que o líquido é armazenado num reservatório. O líquido que se move sob pressão gira o motor, uma vez que flui através dele e, depois, retorna para o reservatório. O ciclo repete-se, assim o motor é mantido em funcionamento. Tudo isso acontece graças a um conjunto de partes distintas, como a bomba hidráulica, válvulas e mangueiras. A bomba hidráulica é usada para conduzir o fluido, sendo que a bomba de engrenagem é o modelo mais comum para trabalhar com um motor hidráulico



Figura 23 – Exemplo de motor hidráulico (Direct Industry)

#### 3.3.1.7 *Motor sem escovas*

Os motores de corrente contínua sem escovas, ou motores *BLDC* (*Brushless DC*), Figura 24, são motores elétricos síncronos alimentados por um inversor (*driver*) através da alimentação de corrente contínua normalmente de baixa tensão. Oferecem diversas vantagens sobre os motores de corrente contínua com escovas, entre as quais se podem destacar a fiabilidade elevada, o ruído reduzido, a vida útil mais longa (devido a ausência de desgaste da escova), a eliminação da ionização do comutador e a redução total de EMI (Interferência Eletromagnética). A desvantagem principal do motor sem escovas é o custo mais elevado, devido ao facto destes motores necessitarem de dispositivos *MOSFET* (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) de alta potência, no fabrico do controlador eletrónico de velocidade.

Os motores BLDC necessitam de um circuito integrado mais caro, chamado de controlador eletrónico de velocidade, para oferecer o mesmo tipo de controlo variável.

A única desvantagem de um motor sem escovas é o seu maior custo inicial, mas o retorno desse custo é conseguido tendo em conta a sua maior eficiência durante a vida útil.

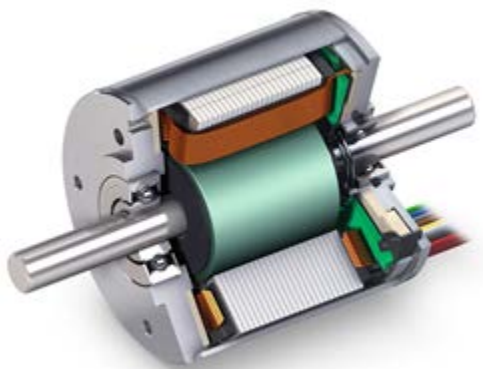


Figura 24 – Componentes internos de um motor sem escovas (*Design World*)

### 3.3.1.8 *Análise SWOT dos tipos de motores.*

Foi elaborada uma análise SWOT onde foram ponderados todos os aspetos positivos e negativos de cada proposta, de modo a poder escolher uma melhor solução. As características de cada motor foram obtidas através de reuniões, ou contacto telefónico com os comerciais das marcas.

Tabela 8 – Análise SWOT ao servo redutor

Forças	Fraquezas
Posicionamento preciso	Preço da componente eletrónica (servosistema)
Oportunidades	Ameaças
Maior controlo no posicionamento da barreira	Eletrónica complexa

Tabela 9 - Análise SWOT ao motor de passo

Forças	Fraquezas
Posicionamento preciso	Preço Elevado
Oportunidades	Ameaças
Maior controlo no posicionamento da barreira. Eliminação de <i>microswitch</i> .	Eletrónica complexa

Tabela 10 - Análise SWOT ao motor hidráulico

Forças	Fraquezas
Maior potência	Preço elevado
Oportunidades	Ameaças
Menor esforço do motor para transmitir o movimento	Alimentação complexa – sistema hidráulico

Tabela 11 - Análise SWOT ao motorreductor

Forças	Fraquezas
Motor e reductor num só componente. Eletrónica simples.	Dimensão. Rotações muito elevadas.
Oportunidades	Ameaças
Diminuir a relação de engrenagem no reductor. Diminuir o custo do reductor.	Espaço na caixa do mecanismo.

Tabela 12 - Análise SWOT ao motor elétrico de ímanes permanentes

Forças	Fraquezas
Preço baixo. Movimento constante.	Desgaste das escovas.
Oportunidades	Ameaças
Eletrónica simples.	Campo magnético pode bloquear a barreira.

Tabela 13 - Análise SWOT ao motor sem escovas

Forças	Fraquezas
Menor manutenção. Maior vida útil.	Preço elevado.
Oportunidades	Ameaças
Maior fiabilidade.	Controlo eletrónico complexo.

### 3.3.1.9 *Solução para o Redutor (prolema 2)*

As soluções propostas para a redução de custos do redutor passaram pela alteração de número de dentes, módulo e largura das engrenagens. Em primeiro lugar, foi realizado o cálculo da relação existente no mecanismo atual. Os requisitos seguidos para o cálculo foram os 1,95 N·m como binário mínimo, as 440 rpm e os 90 W transmitidos pelo motor, com a obrigação de ter no último patamar aproximadamente 2 rpm e 400 N·m. Dentro das soluções existentes, foi estudada a alteração do setor dentado acoplado ao veio, assim como a eliminação de um patamar de redução e a alteração do módulo das engrenagens para um módulo compatível com as opções normalizadas disponíveis no mercado. Também foram objeto de estudo os redutores normalizados da SEW ou ABB, com e sem-fim. É necessário assegurar a existência da opção manual para o movimento da barreira em caso de emergência ou manutenção. Outro requisito para o desenho do redutor é a não alteração dos suportes do atual, e o desenvolvimento de uma tampa de proteção para evitar que pedaços de cablagem ou pós interfiram com o movimento das engrenagens, assim como a incorporação de um acumulador de óleo, para que este não se espalhe pela base do bloco do mecanismo.

### 3.3.1.10 *Redutor normalizado*

Durante a fase de pesquisa, foi estudada a incorporação de um redutor para tornar o sistema mais modular e envolver menos componentes manuseados durante a construção ou manutenção do mecanismo da PN. Foram contactadas empresas como a SEW e a ABB. No entanto, esses redutores eram destinados a grandes rotações e elevados binários, quando comparados com os existentes no mecanismo. Este tipo de solução implicaria uma reformulação do bloco do mecanismo, devido ao maior espaço que ocupa, e também uma alteração do sistema de transmissão de movimento entre o redutor e veio.

### 3.3.1.11 *Alteração do sector dentado (engrenagens standard)*

Usando o atual número de dentes do redutor, o módulo das engrenagens foi alterado para valores compatíveis com os existentes nos catálogos de empresas fornecedoras (exemplo: Rolisa). Estas empresas têm engrenagens, em *stock*, prontas para uso e para entrega rápida, e que denominam por engrenagens *standard*. Os módulos deste tipo de engrenagens variam entre 1 e 6. Na solução da Tabela 14, os módulos das engrenagens foram reduzidos, comparativamente aos da Tabela 4.

Tabela 14 – Solução 1 para o redutor com a alteração do módulo

	Z roda	Z pinhão	Módulo (m)		rpm (N*I)	I = Zr/Zp	Mt = I x Mt (N·m)
<b>Motor</b>		15	2	3	440		1,95
<b>1º Patamar</b>	100	14	2	3	66	6,67	13,03
<b>2º Patamar</b>	110	14	3	4	8,4	7,86	102,366
<b>3º Patamar</b>	58	Veio	4		2,03	4,14	424,087

### 3.3.1.12 *Dentado do veio com módulo 3*

Na solução da Tabela 15, o módulo foi aumentado, mantendo o número de dentes do pinhão do 1º patamar e diminuindo o seu módulo para  $m=3$ , de modo a obter uma evolução gradual de módulos, desde o ataque do pinhão do motor até a saída de movimento no dentado do veio.

Tabela 15 - Solução 2 para o redutor com a alteração dos módulos

	Z roda	Z pinhão	Módulo (m)		rpm (N*I)	I = Zr/Zp	Mt = I x Mt (N·m)
<b>Motor</b>		20	1	2	440		1,95
<b>1º Patamar</b>	120	14	1	2	73,33	6	11,73
<b>2º Patamar</b>	120	14	2	3	8,56	8,57	100,51

<b>3º Patamar</b>	58	Veio	3	2,07	4,14	416,78
-------------------	----	------	---	------	------	--------

### 3.3.1.13 *Alteração do setor dentado*

Na solução da Tabela 16, o setor dentado do veio teve um aumento do número de dentes (de Z=58 para Z= 100), o que influenciou a relação de transmissão por todo o redutor, mantendo os módulos em evolução gradual (1-3) até ao veio. Os pinhões também sofreram um aumento no número de dentes, de modo a terem o número mínimo de dentes que evitava interferência entre as engrenagens.

Tabela 16 - Solução 3 para o redutor com a alteração do dentado do veio

	Z roda	Z pinhão	Módulo (m)		rpm (N*I)	I = Zr/Zp	Mt = I x Mt (N·m)
<b>Motor</b>	-	20	-	1	440	-	1,95
<b>1º Patamar</b>	120	17	1	2	71,47	6	11,73
<b>2º Patamar</b>	100	17	2	3	12,15	5,88	68,9
<b>3º Patamar</b>	100	Veio	3		2,07	5,88	405,73

### 3.3.1.14 *Análise SWOT da normalização dos componentes do redutor*

Na análise SWOT dos componentes para o redutor, concluiu-se que para aplicar um redutor normalizado (Tabela 17) seria necessário uma ligação ao veio mais complexa, com provável aumento de peças, o que poderia causar mais componentes sujeitos a uma potencial falha, quando comparado com a aplicação de engrenagens normalizadas.

Tabela 17 - Análise SWOT Redutor normalizado

Forças	Fraquezas
Preço.	Dimensão. Próprio para rotações elevadas.
Oportunidades	Ameaças
Normalização dos componentes.	Não cabe na caixa do mecanismo. Ligação ao veio complexa.

Tabela 18 - Análise SWOT Engrenagens normalizadas

Forças	Fraquezas
Preço. Simplicidade do processo.	Prazos de entrega podem ser maiores.
Oportunidades	Ameaças
Diminuição das dimensões e ruído. Redução do número de peças.	Não pode ultrapassar as dimensões do atual redutor.

### 3.3.2 Solução para resolver os problemas do veio com dentado (Problema 3)

O efeito da oxidação, Figura 25, pode ser observado ao fim de algum tempo nos veios do mecanismo, apesar da atual proteção de superfície de *parcolubrite* (fosfatação), sendo necessário estudar alternativas que garantam uma proteção da superfície uniforme e constante para uma vida útil de 30 anos.



Figura 25 – Oxidação branca num veio de um mecanismo

### 3.3.2.1 *Oxidação a negro*

A oxidação a negro, Figura 26, é um processo equivalente à aplicação de parcolubrite, e consiste num revestimento de conversão para materiais ferrosos. É usado para evitar corrosão e para a melhorar o acabamento. É usual neste processo impregnar a camada de óxido com óleo ou verniz, para melhorar a resistência à corrosão em situações pouco exigentes. As grandes vantagens desse tipo de revestimento é a pequena espessura de camada e o baixo custo. Nos aços de baixa liga, o óxido criado é o  $Fe_3O_4$  (magnetita), que é resultado de uma reação química de oxidação do produto do banho com a superfície da peça, formando o óxido. Essa camada impede a formação do óxido vermelho  $Fe_2O_3$  (ferrugem). O processo de oxidação negra é feito através de banhos químicos, normalmente alcalinos.



Figura 26 – Exemplo da aplicação de *Parcolubrite* (Oxidação a negro), numa engrenagem (<https://www.youtube.com/watch?v=llgOiotN8Go>)

### 3.3.2.2 *Niquelagem*

A niquelagem é um processo que deposita uma fina camada de níquel sobre um metal de base. Alguns dos benefícios do revestimento de níquel incluem aumento da resistência à corrosão ou oxidação, resistência melhorada ao desgaste e ductilidade melhorada. O método de niquelagem é muitas vezes visto em acessórios para uso doméstico, tais como torneiras, dobradiças e em aparelhos eletrodomésticos, como torradeiras. Usa-se a niquelagem na indústria militar e aeroespacial para proteger peças. O revestimento de níquel produz uma superfície dura e brilhante, que proporciona elevada resistência à corrosão, e é adequado para usar em condições altamente ácidas, como no caso da perfuração de petróleo ou em minas de carvão. As vantagens do revestimento de níquel incluem um acabamento mais atraente, melhor ductilidade e um processo menos dispendioso, Figura 27.



Figura 27 – Componente sujeito a um banho de niquelagem ([industrialmetalfinishing.net/metal-plating](http://industrialmetalfinishing.net/metal-plating) )

### 3.3.2.3 Galvanização

O processo mais utilizado é a galvanização por imersão a quente, Figura 28. Através deste processo, os materiais são protegidos mesmo sob as condições mais desfavoráveis e a vida do produto é prolongada no tempo. No final do ciclo de vida, o produto pode ser completamente reciclado em nova fusão. O processo de galvanização é um método de revestimento de metais corrosivos. O zinco é fundido e aplicado geralmente via imersão a quente para o metal, fornecendo uma camada de proteção adicional contra a corrosão. Quando curado, o zinco, por meio da reação com o metal revestido, torna-se carbonato de zinco.



Figura 28 – Banho de galvanização, retirada das peças ([lagalvanisation.com/](http://lagalvanisation.com/))

#### 3.3.2.4 *Galvanização a Frio*

A galvanização a frio é aplicada em modo de *spray* e é uma ótima opção, já que pode conter até 90% de zinco, que protege a superfície quando é riscada, sendo que um revestimento de óxido de zinco insolúvel é formado na área exposta. Em trabalhos de estruturas, construídas a partir de metal galvanizado, a pintura, com o tempo, vai requerer uma demão. É recomendado o uso de poliuretano, epóxi ou tinta esmalte, a fim de melhor proteger contra a corrosão. Para uma correta aplicação deste tipo de solução, o aço que será galvanizado a frio precisará de ser lavado e tratado quimicamente, para remover todas as impurezas e a oxidação da superfície do metal. Este processo, além de ter um grande poder de fixação em superfícies galvanizadas, produz a conversão dos óxidos por diferença de potencial eletroquímico entre o Fe e o Zn, e por isso pode ser aplicado diretamente sobre o óxido de ferro, sendo aplicado a temperaturas até 150°C, em caso de manutenção preventiva, ou em aplicações temporárias.

#### 3.3.2.5 *Revestimento PVD*

O PVD (*Physical Vapour Deposition*), Figura 29, é um tipo de proteção de superfície que tanto pode ser utilizado com o objetivo de proteger o material onde é aplicado, como apenas com um objetivo estético. De forma resumida, é um processo em que o material de proteção sofre uma sublimação seguida de condensação, sob a forma de um filme, na superfície do metal a proteger. Este processo permite a deposição de metais de elevada pureza, ligas metálicas ou vários compostos cerâmicos (nitretos, óxidos e carbonetos), permitindo criar produtos praticamente isentos de defeitos, uma vez que as temperaturas atingidas pelo substrato são relativamente baixas, até um máximo de 500°C. É um processo aplicável a praticamente todos os tipos de metais ou plásticos, quer estes assumam o papel de substratos ou revestimentos, embora a temperatura possa ser uma limitação na deposição em alguns plásticos. A aplicação de PVD permite obter revestimentos mais duros e mais resistentes à corrosão, bem como mais “amigos do ambiente” do que outros processos, como por exemplo a eletrodeposição. Durante o processo, o material de revestimento sólido de alta pureza (exemplo: titânio, cromo ou alumínio) é evaporado por calor ou por bombardeamento com iões (pulverização catódica). Ao mesmo tempo, é adicionado um gás reativo (por exemplo, azoto ou um gás contendo carbono). As propriedades do revestimento, tais como dureza, estrutura, resistência química, resistência à temperatura ou adesão, podem ser controladas com precisão.



Figura 29 – Exemplo de uma camada de revestimento PVD (TEandM)

Os revestimentos PVD aumentam a rigidez e a resistência ao desgaste Figura 30 b), permitem reduzir a fricção e melhorar a resistência à oxidação Figura 30 a). A utilização de tais revestimentos tem como objetivo um desempenho melhorado e uma maior duração de vida.

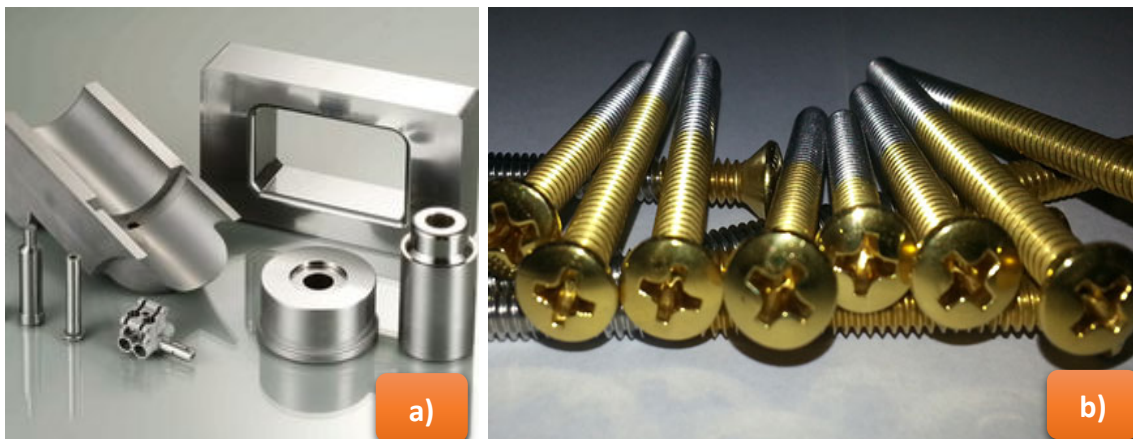


Figura 30 – Aplicação PVD de crómio(a), e de titânio (b) em componentes

### 3.3.2.6 *Aço inoxidável*

Os aços inoxidáveis são comumente utilizados em aplicações onde é necessária a resistência a corrosão. Sendo o crómio o principal elemento de liga, que varia entre os 11,5% e os 30%, deve ser escolhido o aço correto para a aplicação em causa. São aços mais caros que os aços ao carbono, mas sobre ambientes corrosivos, Figura 31, forma uma película superficial, quando em contacto com o oxigénio, atingindo um estado passivo. Esta solução garante uma camada protetora contra a corrosão, uniforme e permanente, sendo unicamente necessária a maquinação do material, evitando o tratamento de superfície. A ligação entre o aço inoxidável e outros aços pode criar um elemento galvânico, por isso é necessário evitar a utilização da ligação entre o aço inoxidável e outros metais. Por razões de segurança, deve existir um isolamento. Existem quatro tipos de aço inoxidável:

- **Ferríticos (família normativa 430, 409 e 410S):** possuem de 11 a 17% de crómio e menos de 0,3% de carbono. Não contêm níquel e são mais económicos. Os aços ferríticos possuem grande resistência á corrosão sob tensão e a sua resistência pode ser incrementada por trabalho a frio. Apresenta fácil conformação, são magnéticos e soldáveis com alguns cuidados especiais.
- **Martensíticos (família normativa 420):** contêm entre 12% a 18% de crómio e de 1% a 1,5% de carbono. Podem receber tratamento de têmpera, adquirindo elevados níveis de dureza e resistência mecânica. São magnéticos, pouco soldáveis, apresentando baixa resistência a corrosão.
- **Austeníticos (famílias normativas 301, 304, 304L, 316 e 316L):** com 17% a 25% de crómio, e de 7% a 20% de níquel, apresentam alta ductilidade e soldabilidade, sendo o tipo de aço inoxidável mais utilizado por apresentar melhor resistência à corrosão, principalmente se adicionados elementos como o molibdénio ou reduzido teor de carbono. Não são magnéticos e podem ser utilizados para trabalhos a temperaturas muito baixas (menor que 0°C) ou muito altas (até 925°C).
- **Duplex e Super Duplex:** Formado por uma estrutura dupla de matriz ferrítica com pequenas zonas de austenite e que apresenta características de elevada resistência mecânica e à corrosão.



Figura 31 – Exemplo da aplicação de aço inoxidável na indústria petrolífera (petrosteel.ca/applications)

### 3.3.2.7 *Análise SWOT para as soluções do veio com dentado*

Na sequência da análise SWOT, foi concluído que a aplicação de PVD, Tabela 22, ou do aço inoxidável no veio, Tabela 23, são as melhores soluções de forma a garantir uma proteção duradoura e constante ao longo do tempo de operação, sendo a grande diferença entre estas duas soluções, o preço e o tempo de entrega. No caso do PVD, há ainda restrições devido às dimensões da câmara de vácuo.

Tabela 19 - Análise SWOT do processo de banho de Niquelagem

Forças	Fraquezas
Vida útil longa. Proteção completa.	<i>Lead-time</i> longo.
Oportunidades	Ameaças
Permite acabamentos estéticos. Inspeção rápida.	Espessura pode não ser uniforme.

Tabela 20 - Análise SWOT do processo de Galvanização a quente

Forças	Fraquezas
Baixo custo de manutenção. Vida útil longa. Proteção completa.	Custo elevado.
Oportunidades	Ameaças
Inspeção rápida. Proteção de áreas danificadas. Permite acabamentos estéticos.	<i>Lead-time</i> mais longo, dependendo do número de unidades, devido à limitação da dimensão dos banhos de Zinco. Proteção pode não ser uniforme.

Tabela 21 - Análise SWOT do processo de Oxidação a negro

Forças	Fraquezas
Melhora a resistência à corrosão. Baixo custo.	Após a maquinação do veio é necessária mais uma etapa. Processo moroso.
Oportunidades	Ameaças
Pequena espessura de camada. Bom acabamento.	Não garante camada uniforme em todo o veio.

Tabela 22 - Análise SWOT do processo PVD

Forças	Fraquezas
Camada uniforme de proteção contra a corrosão. Resistência mecânica.	Câmara do equipamento pode não ter tamanho suficiente para o tamanho do veio.
Oportunidades	Ameaças
Acabamento superficial. Acabamento do veio.	Preço.

Tabela 23 - Análise SWOT da aplicação do Aço inoxidável

Forças	Fraquezas
Alta resistência à corrosão em meio marítimo. Camada permanente contra a corrosão.	Grande variação de preço.
Oportunidades	Ameaças
Redução de tempos de entrega por parte do fornecedor (só é necessária a maquinação). Material com bom acabamento.	Corrosão galvânica com o dentado do veio.

### 3.3.3 Solução para o acoplamento dentado do veio

As chavetas, Figura 32, asseguram ligações desmontáveis de veios com cubos, entre os quais há ajustamentos cilíndricos ou cónicos. As ligações de chaveta previnem a rotação relativa entre duas partes, permitindo ainda a transmissão de torque. As uniões por chavetas são utilizadas, apenas, para a transmissão de pequenas potências. As chavetas são alojadas em ranhuras designadas por escatéis. A aplicação de chavetas ligada peças em rotação e em translação. Apesar da utilidade da aplicação de ligações de chavetas, entre os inconvenientes deste tipo de ligações estão: a debilitação do veio e do cubo, na zona dos escatéis, agravada com veios ociosos ou cubos de parede

fina, a concentração de tensões devida à forma desfavorável dos escatéis, e a pequena capacidade de transmissão de potência.



Figura 32 – Exemplo da aplicação da chaveta num veio (cranford-engineering.co.uk/gallery)

### 3.3.3.1 *Análise SWOT da solução*

A aplicação da chaveta na ligação ao veio dá a todo um mecanismo um modo de falha mais seguro do que o que é atualmente utilizado pois, como analisado na Tabela 24, este componente funciona como um fusível mecânico em caso de sobrecarga na barreira.

Tabela 24 - Análise SWOT do processo Chaveta

Forças	Fraquezas
Falha segura – funciona como um fusível mecânico. Resistência do material.	Necessita montagem precisa.
Oportunidades	Ameaças
Melhora a manutenção do sistema veio/dentado.	Se mal montada pode danificar o veio.

### 3.3.4 *Solução para resolver o problema dos rolamentos*

Um rolamento é um componente que permite o movimento relativo entre duas ou mais partes. São aplicados em situações em que as alterações bruscas de regime e as fases frequentes de arranque e paragem impedem o uso de mancais de deslizamento.

Num mancal de rolamento, o atrito entre as esferas ou rolos é muito maior pois resulta do cisalhamento de um fluido, pelo que é consumida mais potência do que num mancal de deslizamento. Os rolamentos são aplicados neste caso devido às elevadas cargas a que estão sujeitos. Os rolamentos podem ser lubrificados com massas lubrificantes, em sistemas abertos ou de caixa selada (em ambientes contaminantes), desde que o sistema tenha velocidade baixa, pois as massas tendem a ser projetadas pela força centrífuga.

#### 3.3.4.1 *Rolamento de esferas*

Os rolamentos rígidos de esferas, Figura 33, são versáteis. São de conceção simples, de tipo não separável, indicados para velocidades elevadas e extremamente elevadas, resistentes em operação e exigindo pouca manutenção.

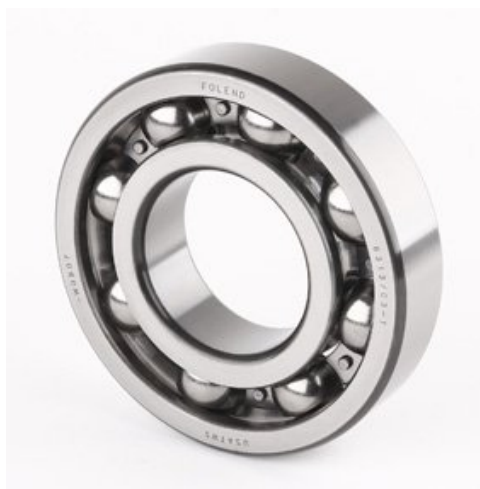


Figura 33 – Rolamento de esferas sem as cedações ( Shaeffler)

#### 3.3.4.2 *Rolamentos cilíndricos de uma única fila*

A maioria dos rolamentos de rolos, Figura 34, compreende rolamentos de uma fila única de rolos com gaiola. Os rolamentos de uma e duas carreiras de rolos com conjunto completo de rolos (sem gaiola) completam a linha padrão da *SKF* para engenharia geral. Os rolamentos com gaiola podem suportar cargas radiais altas e funcionar em velocidades elevadas. Os rolamentos com conjunto completo de rolos são adequados para cargas radiais extremamente altas em velocidades moderadas. A sua geometria proporciona uma distribuição ideal das tensões nas zonas de contato do rolamento. Os benefícios provenientes disto, em comparação com modelos tradicionais, compreendem o funcionamento mais confiável e maior insensibilidade a problemas de alinhamento.



Figura 34 – Rolamento de rolos em corte, proposto para aplicação no protótipo (Shaeflller)

### 3.3.4.3 *Esferas vs Rolos*

As operações de PN dependem do tráfego de comboios, na linha em que estão instaladas, o que significa que podem fazer 200 ciclos/dia ou apenas um. Então, o rolamento PN está a maior parte do tempo estático, e não em operação. Dependendo do peso das barreiras e contrapesos, as esferas danificam a pista de rolamento num período de tempo mais curto do que o esperado.

### 3.3.4.4 *Análise SWOT das soluções*

Apesar do maior preço dos rolamentos de rolos, conclui-se que para efeitos de protótipo, é interessante para o projeto que se teste uma solução pela qual não seja necessário fazer alterações em dimensões, com o objetivo de no futuro aplicar em barreiras mais compridas. Este caso aplica-se aos rolamentos de rolos série 209 ECP 2RS, Tabela 26, que tem as mesmas dimensões exteriores que os da série 6000.

Tabela 25 - Análise SWOT da aplicação de rolamentos de Esferas

Forças	Fraquezas
Boa capacidade para suportar cargas radiais. Baixo custo.	Menor resistência à variação da rotação.
Oportunidades	Ameaças
Pouca manutenção. Versatilidade dos rolamentos.	Requerem alta rotação.

Tabela 26 - Análise SWOT da aplicação de rolamentos de Rolos

Forças	Fraquezas
--------	-----------

Permitem deslocamento axial do veio. Maior capacidade de carga.	Preço.
<b>Oportunidades</b>	<b>Ameaças</b>
Desmontáveis – montagem facilitada.	Carga sobre os rolos insuficiente para transmitir movimento de rotação.

### 3.3.5 Solução para resolver o problema da Chumaceira

#### 3.3.5.1 Solução 1

Para resolver o problema mantendo a estrutura da chumaceira, foi aberto um rasgo de 1 mm de profundidade numa pista com 7 mm de largura numa calha, Figura 35, com uma ligeira inclinação, no lado inferior da chumaceira. Com esta solução, evita-se que a água penetre por capilaridade na folga entre o veio e a chumaceira e, quando atingir a zona do rasgo, caia por gravidade e seja expulsa da zona da chumaceira, evitando a sua concentração junto do rolamento, mantendo-se o corrimento do fluido.

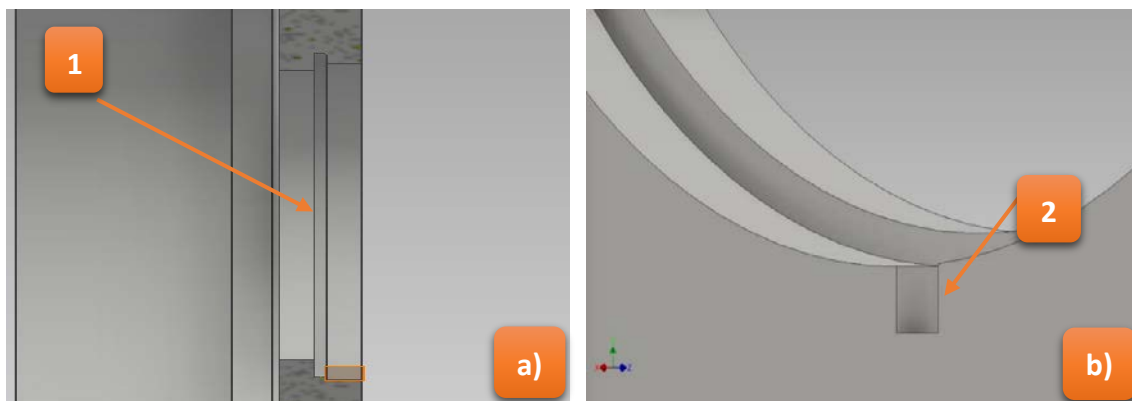


Figura 35 – Vista da calha em corte (a) e frontal (b)

#### 3.3.5.2 Solução 2 (Vedantes)

Em contrapartida à alteração da chumaceira com a calha interior, poderá ser aplicado na zona entre o veio e o diâmetro interno um vedante, de forma a evitar as infiltrações de água e poeiras que posteriormente vão danificar os rolamentos. A função dos vedantes é garantir a estanqueidade de chumaceiras e depósitos. A temperatura de funcionamento é importante na seleção dos vedantes, pois a maioria das borrachas e dos polímeros não suporta temperaturas elevadas. Alguns elastómeros e polímeros degradam-se com o tempo e meio ambiente (acidez, radiação, humidade, etc.). Para colmatar este aspeto, é necessário escolher o lubrificante e os seus aditivos, de modo a que não degradem esses materiais para que não ocorram reações químicas inesperadas. Caso a finalidade principal seja excluir os contaminantes, o retentor deverá estar voltado para fora, como demonstrado na Figura 36. Os vedantes de anel em V (V- Ring) podem ser utilizados tanto com a lubrificação com óleo como com a

lubrificação com massa lubrificante. O anel de borracha elástica envolve firmemente o eixo e gira com ele, enquanto o retentor do vedante exerce uma leve pressão axial no componente estacionário, como, por exemplo, a caixa. Dependendo do material, os anéis em V poderão ser utilizados em temperaturas de funcionamento entre  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $+150^{\circ}\text{C}$ . Eles são simples de instalar e em baixas velocidades permitem desalinhamentos angulares do eixo relativamente grandes. Uma rugosidade de superfície  $R_a$  entre 2 e  $3\ \mu\text{m}$  é suficiente para a contra face. Em velocidades periféricas acima de  $8\ \text{m/s}$ , o anel em V deve estar fixado axialmente no eixo. Em velocidades acima de  $12\ \text{m/s}$ , o anel deve ser impedido de se "elevar" do eixo, por exemplo, por um anel de suporte de metal laminado. A boa ação de vedação do anel em V depende principalmente do facto de que o corpo do anel age como um defletor, repelindo as impurezas e fluidos. Usando massa lubrificante, o vedante é geralmente disposto fora da caixa, enquanto para a lubrificação com óleo, ele é normalmente disposto dentro da caixa com o retentor apontando para fora em relação à posição do rolamento. Utilizado como um vedante secundário, os anéis em V protegem o vedante principal de contaminantes e humidade excessivos.

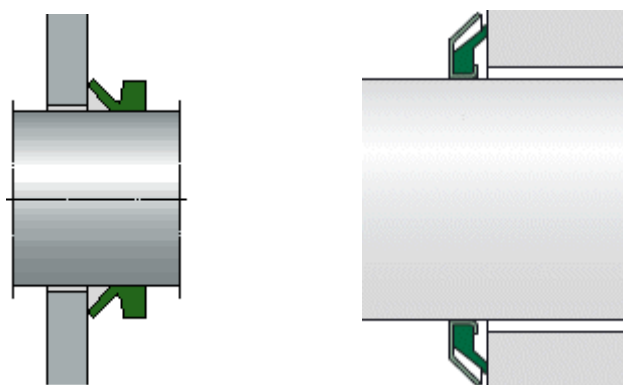


Figura 36 – Demonstração da inclusão de retentores V-Ring em diferentes posições, (SKF Vedantes)

### 3.3.5.3 *Análise SWOT das propostas*

Apos a elaboração da análise SWOT, conclui-se que apesar de serem duas soluções viáveis para o impedimento de infiltrações e água no mecanismo, a aplicação de um V-ring, Tabela 28, conferia uma melhor proteção, pois garante a estanqueidade da chumaceira.

Tabela 27 - Análise SWOT da aplicação de uma Calha na chumaceira

<b>Forças</b>	<b>Fraquezas</b>
Escoamento da água. Modificação ligeira da peça.	Preço de produção da solução.
<b>Oportunidades</b>	<b>Ameaças</b>

Solução simples. Pode ser aplicada, como uma actualização para as que estão no terreno.	Podem entrar insectos. Pode entupir.
--	---

Tabela 28 – Análise SWOT da Aplicação de vedantes na chumaceira

<b>Forças</b>	<b>Fraquezas</b>
Mantém a água fora da chumaceira.	É necessário verificar o estado dos vedantes de 6 em 6 meses.
<b>Oportunidades</b>	<b>Ameaças</b>
A chumaceira com a inclusão de vedantes pode ser utilizada para uma actualização das que estão no terreno.	Pode mudar a estética, no conjunto do mecanismo.

### 3.3.6 Problemas de corrosão (problema 4)

A corrosão pode ser encarada como o inverso da metalurgia extrativa. No “estado metálico”, as energias dos metais são mais elevadas e, por isso, há uma tendência espontânea da generalidade dos metais para reagirem quimicamente e formarem compostos – óxidos, sulfuretos, etc., regressando assim à forma em que apareciam na natureza. A corrosão é um processo destrutivo e representa enormes perdas económicas, sendo por esta razão necessária a utilização de materiais metálicos e não metálicos alternativos, com custo mais elevado mas com maior resistência à corrosão.

#### 3.3.6.1 Corrosão galvânica

Todos os metais possuem potencial eléctrico, quando metais com diferentes potenciais (aço e cobre, por exemplo) entram em contacto na presença de um eletrólito como a água, formando uma célula galvânica na qual uma corrente de baixa energia flui entre os dois metais. Esta ação galvânica corroi o metal com o maior potencial. O conhecimento dos potenciais dos metais que estão em contacto é fundamental, especialmente os elementos fixadores, como parafusos, rebites, etc. Os metais no mesmo grupo podem estar em contacto sem que haja ação galvânica, já os metais passivos são aqueles que formam filmes superficiais protetores do meio. A passivação tem a ver com a perda de reatividade química na presença de uma determinada condição ambiental. Muitos metais e ligas com importância em engenharia tornam-se passivos e, conseqüentemente, muito resistentes à corrosão na presença de meios oxidantes moderados ou mesmo fortes. Os aços inoxidáveis, o níquel e muitas das suas ligas, o titânio e o alumínio, assim como muitas das suas ligas, constituem exemplos de metais passiváveis. A prevenção da corrosão galvânica tem de ser aplicada em vários pontos do mecanismo, como por exemplo no caso da chaveta e do veio. Essa prevenção pode ser feita ao:

- Evitar metais electroquimicamente muito diferentes;
- Se for necessário juntar dois metais electroquimicamente diferentes, a área do metal menos nobre deve ser superior à do metal mais nobre, para que a corrente galvânica seja baixa;
- Evitar grandes áreas catódicas e pequenas áreas anódicas;
- Se for necessário revestir um dos metais em contacto, o revestimento deve ser aplicado no metal mais nobre;
- Utilizar inibidores;
- Numa construção, os metais mais ativos deverão ser os de mais fácil substituição, como por exemplo parafusos ou rebites;
- Introduzir fitas de proteção de corrosão galvânica.

### 3.3.6.2 *Isolamento de materiais diferentes*

Para impedir a ocorrência do processo de corrosão galvânica, é utilizado um filme plástico com um revestimento protetor adesivo, Figura 37. Este, quando colocado entre duas superfícies de metal, quebra o processo electrolítico, impedindo a corrosão galvânica. Este tipo de produto deve ser aplicado quando é impossível a separação entre dois materiais diferentes.



Figura 37 – Fitas Heskings, proteção contra corrosão galvânica (Heskings)

### 3.3.7 *Pedestal*

Para melhorar o pedestal de forma a resolver o problema da torção, e para operar com barreiras mais pesadas e os consequentes contra pesos, foi proposta a ideia de uma estrutura soldada, equivalente à analisada na secção de análise da concorrência. Esta estrutura forma um esqueleto interno que permite ao pedestal ter uma maior resistência à torção. São requisitos deste componente de PN um acesso aos bornes que permita uma melhor maneabilidade e que todo o sistema de fixação por parafusos migre para o interior do pedestal, para evitar vandalismo.

### 3.3.7.1 *Propostas para o pedestal*

Dentro das propostas realizadas para o pedestal, com uma estrutura soldada de modo a criar um esqueleto interno, é realizada na Figura 38 uma comparação entre as três soluções. Na Figura 38a) o pedestal tem a mesma composição que é atualmente utilizada nos sistemas de passagem de nível comercializados pela EFACEC, sendo constituído exteriormente por duas cantoneiras soldadas, e tendo no seu interior uma estrutura soldada, composta por perfis quadrados de 20 mm de lado. Esta proposta é a que menos altera o *design* do pedestal, tendo o perfil quadrado 20 mm de lado, o que não é fácil de encontrar nos fornecedores. Na segunda proposta, Figura 38b), a largura do pedestal é aumentada para uma largura igual à do prato superior que suporta a caixa do mecanismo. Este fica apoiado diretamente no pedestal através de parafusos, não existindo nenhum componente de interface entre o mecanismo e o pedestal. A estrutura soldada interna é constituída por perfis estruturais de secção quadrada, com 40 mm de lado, soldados. A esta estrutura acrescenta-se uma porta a toda a altura, para permitir um melhor acesso aos componentes elétricos, para além de proteger o operador durante a operação de manutenção/montagem. A terceira proposta, Figura 38c), diferencia-se da segunda, Figura 38b), na secção do pedestal. A largura do pedestal é igual à do mecanismo, tornado mais robusto, mas por outro lado menos estético.

### 3.3.7.2 *Análise SWOT das propostas do pedestal*

A proposta 2, representada na Figura 38, é a que melhor se adequa à solução do pedestal. Apesar de todas as propostas corresponderem ao requisito de resolver os problemas de torção e facilitarem a manutenção, esteticamente é a que melhor se adequa ao bloco do mecanismo.

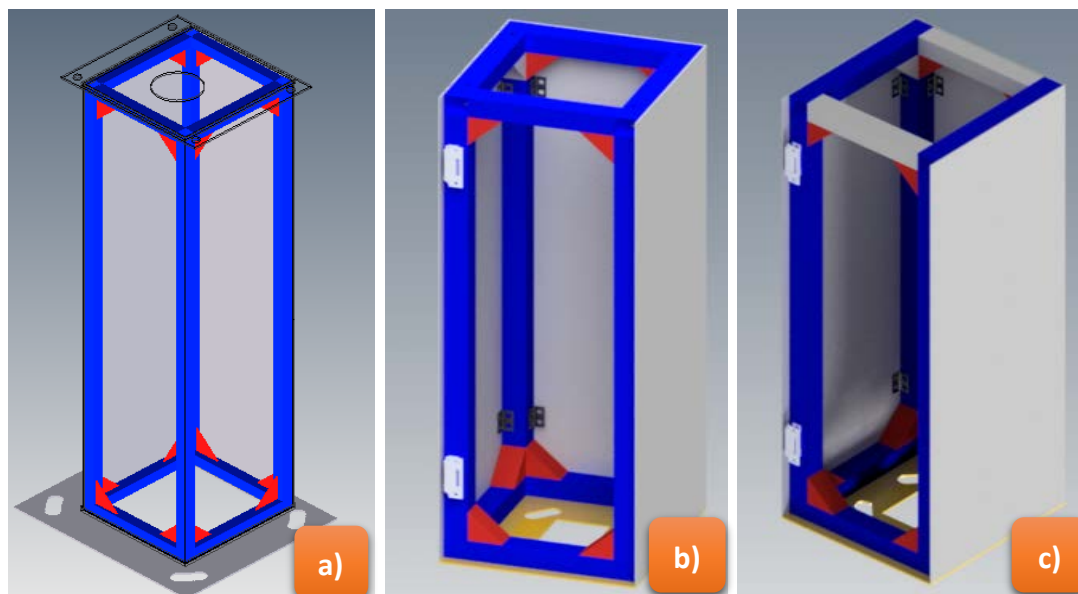


Figura 38 – Propostas de melhoria do pedestal: a) pedestal antigo com esqueleto interno; b) novo pedestal com esqueleto interno e largura do prato superior; c) novo pedestal com largura igual ao da caixa do mecanismo

Tabela 29 – Análise SWOT da Proposta 1 para o pedestal

Forças	Fraquezas
<p>Maior resistência do pedestal actual.</p>	<p>Tubos quadrados de 20 mm de lado, não se encontram com facilidade nos fornecedores.</p>
Oportunidades	Ameaças
<p>Não é necessário um redesenho profundo do conjunto.</p>	<p>Tubos de 20 mm podem não ter resistência para absorver o efeito da torção.</p>

Tabela 30 – Análise SWOT da Proposta 2 para o pedestal

Forças	Fraquezas
<p>Resistência à torção.</p>	<p>Proposta potencialmente mais cara que o pedestal original.</p>
Oportunidades	Ameaças
<p>Porta a toda a altura para manutenção.</p>	<p>Falhas na vedação à volta da porta.</p>

Tabela 31 – Análise SWOT da Proposta 3 para o pedestal

Forças	Fraquezas
Resistência a torção.	O seu tamanho torna o conjunto inestético. Proposta potencialmente mais cara que o pedestal original.
Oportunidades	Ameaças
Porta a toda a altura para manutenção.	Falhas na vedação a volta da porta.

### 3.3.8 Barreira

O objetivo da análise da haste é indicar potenciais caminhos para uma reformulação. Estes poderão incluir a seleção de diferentes materiais, *design* e de processos de fabrico, de modo a tornar o custo/benefício deste componente mais atrativo.

#### 3.3.8.1 Proposta de alteração do material da haste

Durante a análise da concorrência, foi observada a utilização de perfil de fibra de vidro pultrudidos. A pultrusão é o nome atribuído ao processo automático para a produção, em contínuo, de produtos de secção constante, sendo a maior parte destes produtos perfis e tubos. Este processo é aplicado exclusivamente a materiais compósitos. Durante o processo, o material é obrigado a atravessar a fieira através de um sistema de tração que agarra o perfil, de forma contínua. A continuidade do processo tem como vantagens o controle efetivo do processo, resultando em propriedades uniformes e com bom toleranciamento dimensional. Também como resultado da produção contínua que caracteriza o processo, podem ser produzidos perfis com qualquer comprimento, tendo como única limitação o transporte do perfil. A pultrusão é um dos grandes processos dos plásticos reforçados com fibra de vidro (PRFV), embora outros tipos de fibra possam também ser utilizados, com por exemplo as fibras de carbono e aramida (Kevlar®). Este processo tem sido desenvolvido ao encontro das necessidades dos plásticos estruturais com altas propriedades mecânicas e físicas, compósitos, que podem competir com os materiais de engenharia tradicionais como o aço ou o alumínio, Figura 39.

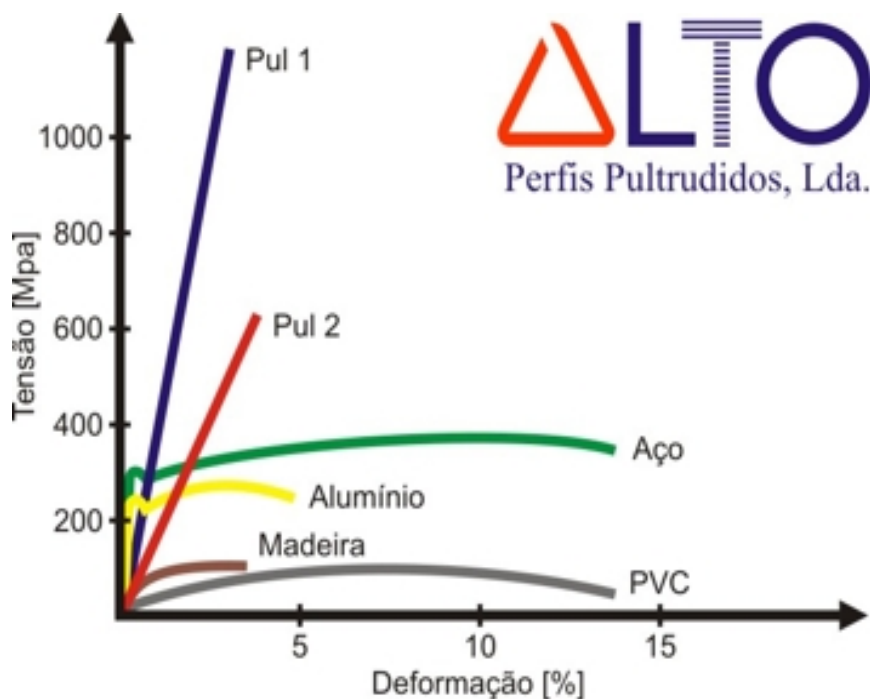


Figura 39 – Gráficos comparativos entre os perfis pultrudidos e outro tipo de materiais ferrosos e não ferrosos (Alto Perfis Pultrudidos, Lda.)

### 3.3.8.2 *Opção para o design da haste*

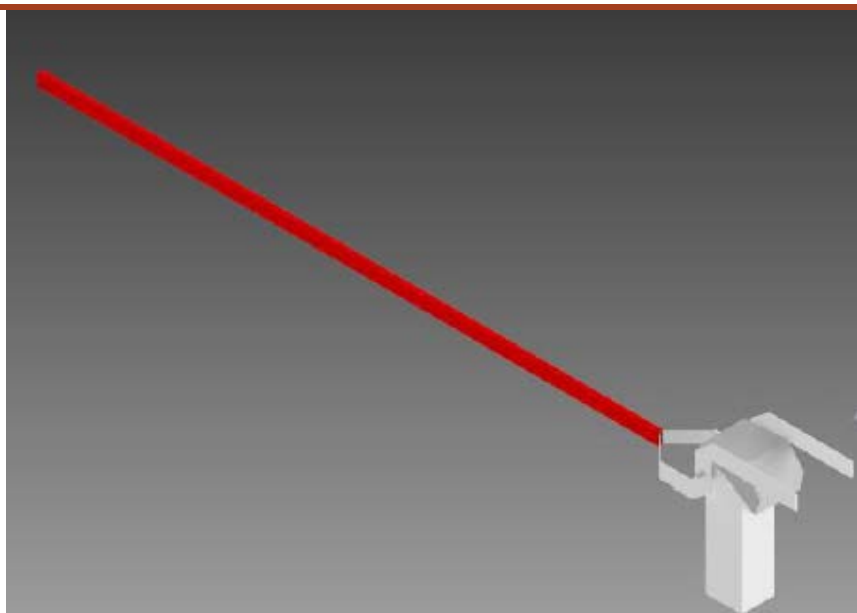
Como se trata de uma solução em fase de avaliação, foi feito um estudo prévio da forma, tipo de barreira, comprimento e fornecedor. Deste estudo foram selecionados três tipos de haste para uma análise final. Os perfis utilizados na construção e simulação foram obtidos através da informação de fornecedores de perfis pultrudidos.

### 3.3.8.3 *Haste de secção quadrada uniforme*

Esta secção de perfil, Tabela 32, foi selecionada para o estudo devido às suas semelhanças com a atual barreira. Apesar de a secção reta ser maior que a da haste de alumínio, o facto de ter um menor peso e uma maior inércia pode beneficiar no comportamento global, quando aplicado na PN.

Tabela 32 - Dados para o estudo da haste quadrada em perfil pultrudido

Fornecedor	Perfil quadrado
ALTO	120 mm x 50 mm
Fiberlines	80 mm x 60 mm

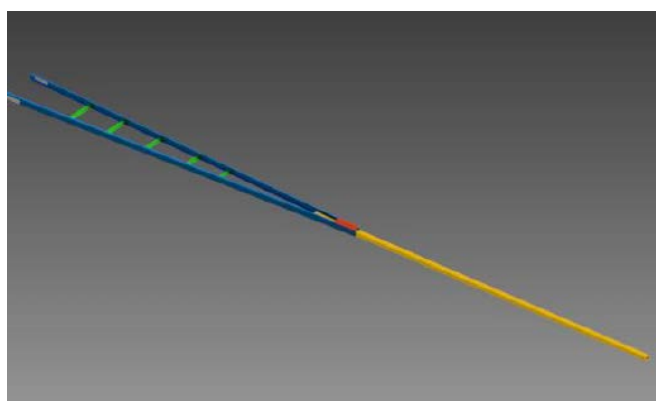


#### 3.3.8.4 *Haste telescópica em Y - 12 metros*

O estudo de uma haste em Y, Tabela 33, foi realizado com o objetivo de atingir uma haste com 12 metros. Este tipo de haste não existe no portefólio de soluções de barreira da EFACEC.

Tabela 33 – Dados para o estudo de uma haste em Y em perfil pultrudido

Fornecedor	Perfil
STEP - Sociedade Técnica de Perfis Pultrudidos	U: 80 mm x 30 mm x 5 mm x 3 mm
	Quadrado 6 m: 50 mm x 50 mm x 5 mm
	Perfis quadrados de apoio: 40 mm x 40 mm x 4 mm
Fiberline	Perfil U: 100 mm x 50 mm x 6 mm x 4 mm
	Perfil quadrado 6 m: 75 mm x 75 mm x 8 mm
	Perfis quadrados de apoio: 80 mm x 60 mm x 5 mm

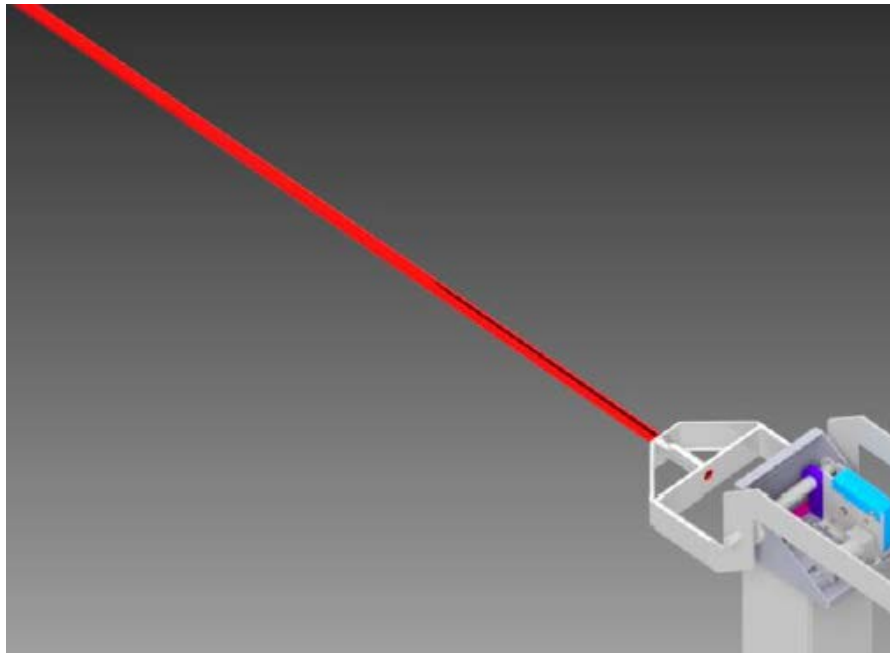


### 3.3.8.5 Haste com secção circular

A ideia de estudar uma haste em perfil pultrudido de secção circular, Tabela 34, surgiu depois de fazer a análise à concorrência nos sistemas de PN. No seguimento das aplicações da Europortes, este tipo de barreira, para além de ter uma inércia maior que as anteriores, a sua forma cilíndrica torna-a aerodinâmica.

Tabela 34 - Estudo da haste cilíndrica no sistema de PN

Fornecedor	Perfil Redondo 6 m
Fibrolux	$\varnothing 1 = 50 \text{ mm}$ ; $\varnothing 2 = 42 \text{ mm}$
Fiberlines	$\varnothing 1 = 90 \text{ mm}$ ; $\varnothing 2 = 80 \text{ mm}$



## 3.4 Seleção das vias mais indicadas para resolver os problemas

### 3.4.1 Solução escolhida para o bloco

Como o sector ferroviário é um meio conservador, e como uma grande alteração de *design* levaria a um longo processo de homologação, ficou decidido que seria utilizada para o protótipo a caixa atual do mecanismo, sem fazer qualquer tipo de alterações.

### 3.4.2 Solução escolhida para o motor

O movimento da barreira é produzido por um motor DC linear (corrente contínua) da Grosschopp (modelo EM 120 - 45K), que é usado em barreiras desde 1982. Atualmente, o produto é especialmente fabricado para a EFACEC, originando maiores

tempos de entrega por parte do fornecedor e custos mais elevados. A procura de um motor normalizado equivalente, dá origem a uma avaliação de comparação entre prós e contras de vários tipos de motores. Este motor permite 400 N·m no eixo com relação de transmissão de caixa de 316:1. Para encontrar um motor DC com as mesmas características, seria uma tarefa difícil devido ao seu fabrico sob medida. O motor escolhido após o estudo de fornecedores e motores foi o PM 8014 da Grosschopp, Tabela 35.

Tabela 35 - Tabela de características do motor

Características do motor	
Tensão: 24 V DC	± 10 %
Corrente nominal	6 A
Binário	≈2 N·m

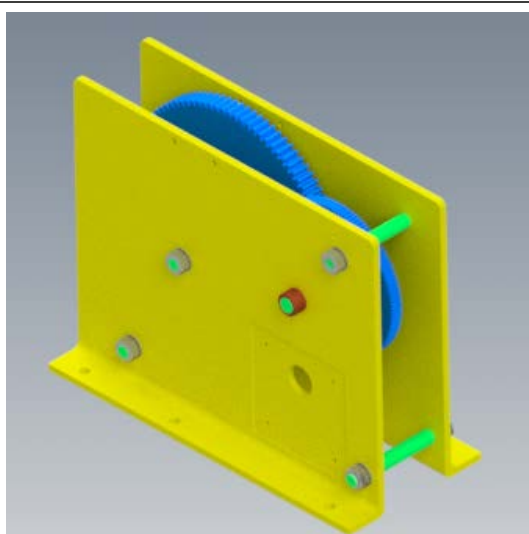
  


### 3.4.3 Solução escolhida para o redutor

A solução da Tabela 36, foi a escolhida para ser aplicada no redutor. Esta escolha ficou a dever-se ao espaço ocupado pelo aumento do diâmetro das engrenagens. Criando uma melhor relação de engrenamento, e com a redução do módulo dos dentes, o engrenamento perde o som metálico, ficando mais suave, para além de se reduzir o número de peças utilizadas no redutor. O dentado do veio aumenta o número de dentes para  $Z=100$ , de modo a obter um momento igual a 405 N·m e 2,07 rpm. Com a inclusão da manivela manual nesta solução, o operador terá de fazer 11 movimentos até abrir ou fechar a barreira, em caso de falha ou manutenção.

Tabela 36 – Características da solução escolhida para o redutor

	Z roda	Z pinhão	Módulo (m)		rpm (N*I)	I = Zr/Zp	Mt = I x Mt (N·m)
<b>Motor</b>	-	20	-	1	440	-	1,95
<b>1º Patamar</b>	120	17	1	2	71,47	6	11,73
<b>2º Patamar</b>	100	17	2	3	12,15	5,88	68,9
<b>3º Patamar</b>	100	Veio	3		2,07	5,88	405,73



#### 3.4.3.1 *Soluções eliminadas*

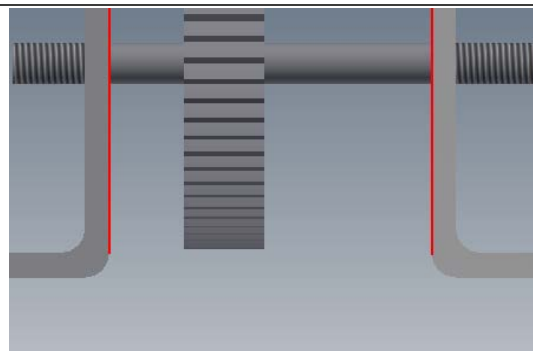
Na secção 5 (anteprojeto), foram propostos três tipos de redutores diferentes. Como todas as propostas de redutor cumpriam com os 440 N·m no veio principal da PN, para fazer uma seleção e atingir uma boa solução para o redutor, as diferentes propostas foram colocadas nos suportes do antigo redutor, principal critério de eliminação neste ponto.

#### 3.4.3.2 *Opção 1*

A eliminação da opção da Tabela 37 deveu-se ao facto de a engrenagem maior deste tipo de redutor ultrapassar os limites dos suportes. O módulo das engrenagens também teve um peso importante, pois o preço do processo de fabrico é maior.

Tabela 37 – Características da solução eliminada

	Z roda	Z pinhão	Módulo (m)		rpm (N*I)	I = Zr/Zp	Mt = I x Mt (N·m)
<b>Motor</b>		15	2	3	440		1,95
<b>1º Patamar</b>	100	14	2	3	66	6,67	13,03
<b>2º Patamar</b>	110	14	3	4	8,4	7,86	102,366
<b>3º Patamar</b>	58	Veio	4		2,03	4,14	424,087

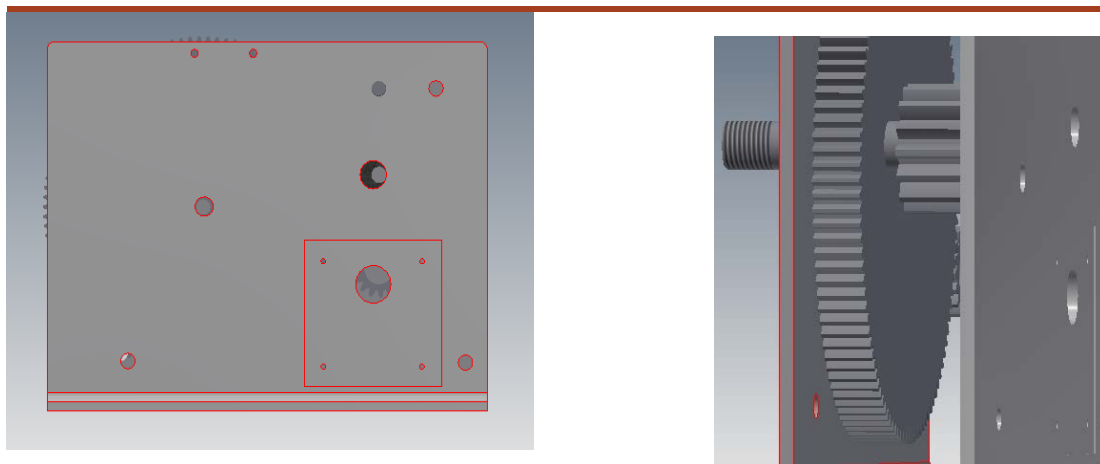


### 3.4.3.3 Opção 2

Assim, verifica-se que a opção da Tabela 38 ultrapassa os limites das chapas do redutor, sendo o maior número de dentes nas engrenagens (e o módulo seleccionado) o maior contribuinte para esse fator.

Tabela 38 – Características da solução eliminada

	Z roda	Z pinhão	Módulo (m)		rpm (N*I)	I = Zr/Zp	Mt = I x Mt (N·m)
<b>Motor</b>		20	1	2	440		1,95
<b>1º Patamar</b>	120	14	1	2	73,33	6	11,73
<b>2º Patamar</b>	120	14	2	3	8,56	8,57	100,51
<b>3º Patamar</b>	58	Veio	3		2,07	4,14	416,78



#### 3.4.4 Solução escolhida para o veio

A solução escolhida para aplicar no veio do mecanismo, foi a aplicação do aço inoxidável, devido à sua resistência à corrosão e à diminuição do *lead-time* do produto. Podemos observar na Tabela 39, o preço/kg de cinco aços inoxidáveis. Os aços escolhidos para fazer a consulta de preços foram organizados pela melhor resistência à corrosão, sendo os do tipo Duplex os com maior destaque no que toca à resistência à corrosão e preço. Os aços *duplex* são usados em silos, cubas, plataformas petrolíferas, ou seja, são aplicados em zonas onde é necessária uma excelente resistência à corrosão, tendo em conta que caso esta falhe, poderá conduzir a consequências graves. Em contrapartida, os outros dois aços da tabela têm menor resistência à corrosão que os *duplex*, mas podem ser utilizados em ambientes menos severos do que os descritos em cima. O AISI 304 e AISI 316, são aços inoxidáveis austeníticos, sendo que este tipo de aço tem a melhor resistência à corrosão dos aços inoxidáveis (excetuando os *duplex*), e tem uma boa soldabilidade, no caso de se manter a engrenagem dentada.

Tabela 39 – Preços de vários tipos de aço inoxidável

Tipo de aço inox	Referência	€/kg	Consulta
Duplex	SAF 2507	≈ 60	Sandwick
Duplex	LDX 2101	≈ 60	Outokumpu
Duplex	SAF 2205	≈ 60	Sandwick
Austenítico	AISI 304	2,80	Ramada
Austenítico	AISI 316	4,44	Ramada

Tendo em conta o fator preço do AISI 304 e do AISI 316, são os aços eleitos para substituir o atual material do veio. Com a comparação da composição química dos *datasheets* da RAMADA AÇOS (Tabela 40), será analisada qual a melhor solução para o veio.

Tabela 40 – Comparação da composição química (% em peso) entre os aços AISI 304 e AISI 316

Elemento	AISI 304	AISI 316
C	0,07	0,07
Si	1	1
Mn	2	2
P	0,045	0
S	0,03	0
Cr	17,50 - 19,50	16,50 – 18,50
Ni	8,00 – 10,50	10 – 13
Mo	0	2 – 2,5

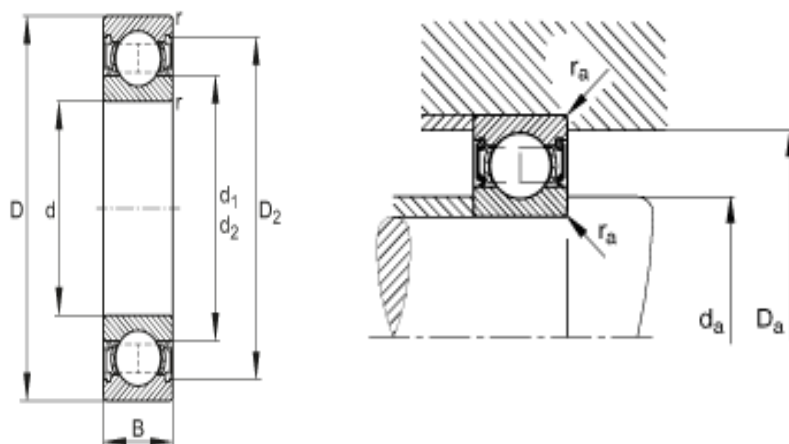
O AISI 316 é o aço inoxidável apropriado pois, a inclusão de molibdénio e o teor de níquel mais elevado na sua constituição, em comparação com o AISI 304, dão a este tipo de aços uma boa resistência à corrosão em ambientes mais agressivos (marítimo), o que solucionará o problema da oxidação na secção central do veio e o problema na corrosão nas pontas.

### 3.4.5 Solução escolhida para os Rolamentos

O eixo tem dois rolamentos que permitem rodar 90 graus durante o ciclo de trabalho da PN, Tabela 41. Uma vez que a barreira, o suporte e os contrapesos são montados no eixo, sofre elevadas solicitações ao aplicar barreiras com 8,5 m de comprimento, ou mais.

Tabela 41 – Especificações técnicas do Rolamento INA 6209 (Fonte INA)

d	45 mm
D	85 mm
B	19 mm
$D_2$	74,6 mm
$D_{a \text{ max}}$	78 mm
$d_1$	57,2 mm
$d_{a \text{ min}}$	52 mm
$r_{a \text{ max}}$	1 mm
$r_{\text{min}}$	1,1 mm



### 3.4.5.1 *Esferas Versus rolos*

As operações de PN dependem do tráfego do comboio, na linha em que estão instaladas, o que significa que ele pode fazer 200 ciclos por dia ou um. Então, o rolamento da PN está mais tempo estático do que em operação. Dependendo do peso das barreiras e contrapesos, as esferas danificam a pista de rolamento num período de tempo mais curto do que o esperado. O uso de rolamentos de rolos resolve o problema de dano da pista de rolamento e pode ser aplicado com barreiras mais pesadas e mais longas, já que o contacto deixa de ser pontual para ser linear, sendo o apoio bastante mais eficaz. Os rolamentos NU 209 ECP 2RS, têm as mesmas medidas que os rolamentos da serie 6209 de esferas, mudando unicamente o formato dos corpos rolantes.

### 3.4.6 *Solução escolhida para a infiltração de água*

As infiltrações de águas e pós são um dos maiores perigos para os rolamentos com aplicação neste sistema. Para evitar este tipo de situação foi modificada a chumaceira, de modo a ter vedações para manter a água e pó fora do rolamento, Figura 40. No novo *design* a chumaceira foi dividida em duas peças, uma tampa para fixar as vedações e a parte que suporta o rolamento. As vedações deste novo *design* da chumaceira incluem um *O-Ring*, que para além de promover a estanqueidade onde a tampa é acoplada, também ajudam na fixação da mesma no apoio do rolamento. A outra parte da chumaceira tem uma depressão onde é colocado um *V-Ring* acoplado ao veio, para que as infiltrações por capilaridade sejam mantidas longe dos corpos rolantes.



Figura 40 - Vedante *V-Ring* a aplicar na nova chumaceira (SKF)

### 3.4.7 Solução da escolha para o pedestal

Este estudo comparativo envolveu simulação de análise de esforços por elementos finitos no Autodesk Inventor®, como pode ser visto na Figura 41. A solução aprovada, é baseada em tubos estruturais de 40 mm x 40 mm, com uma largura crescente em relação ao desenho antigo, Além disso, uma porta de altura total foi adicionada para permitir que a equipe de manutenção tenha mais espaço para trabalhar e, todos os parafusos e componentes de fixação foram alterados para dentro da coluna, evitando por este modo vandalismo.

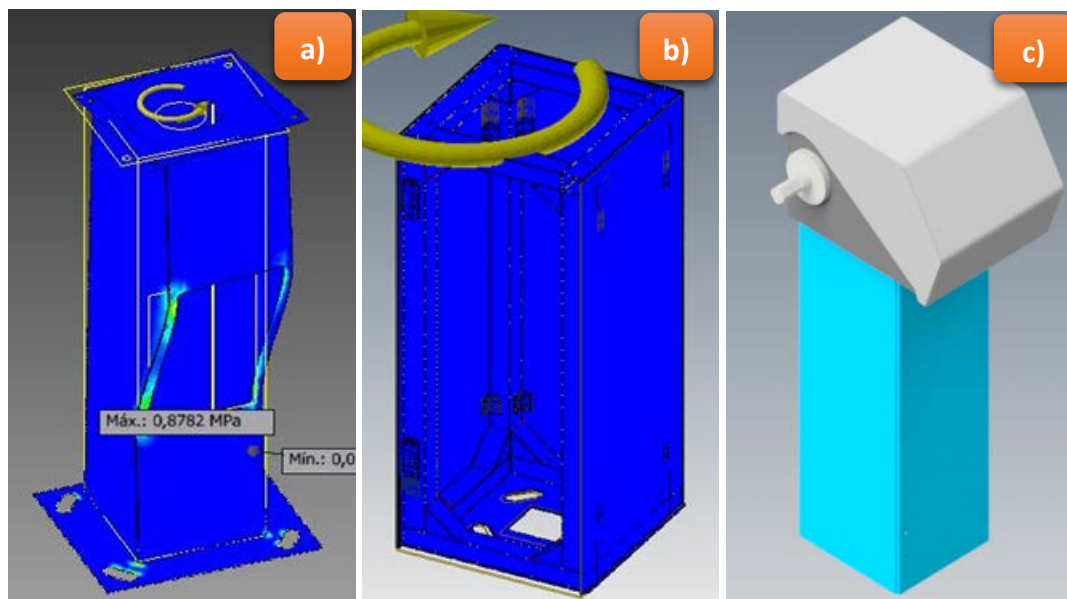


Figura 41 – a) Simulação de elementos finitos do antigo pedestal, b) Simulação por elementos finitos da solução escolhida para o pedestal, c) Solução escolhida inserida no conjunto com o mecanismo

### 3.4.8 Solução da escolha para a haste

A seleção do tipo de haste a utilizar tem que passar por uma aprovação do tipo de material que a constitui. Como a haste de perfil retangular adequa-se ao mesmo acoplamento que a de alumínio, a tarefa de montar a barreira está mais facilitada. Por esta razão, foi pedido à empresa ALTO - PERFIS PULTRUDIDOS, Lda. uma amostra de um perfil retangular com 120 mm x 50 mm x 5 mm. Apesar desta haste em perfil pultrudido ser, no momento, um estudo inicial para aplicar nos mecanismos de meia barreira, a secção retangular com 120 mm x 50 mm x 5 mm melhora a perceção visual de segurança, assim como a distância à qual a barreira pode ser vista pelo condutor. Este perfil também pode ser usado no futuro para aplicar *leds* vermelhos dentro do perfil, situação que é um requisito obrigatório em alguns países e que, com o alumínio, era impossível devido à condutividade elétrica desse material.

### 3.4.8.1 Seleção de materiais

A barreira dos sistemas de PN da EFACEC (6 m) é realizada por vários perfis retangulares de alumínio soldados. Este perfil de alumínio é comumente usado pela maioria dos produtores de PN, mas durante a análise dos concorrentes, foi encontrado o uso de perfis pultrudidos em plástico reforçado com fibra de vidro (*Glass Fibre Reinforced Plastics – GFRP*), especialmente na Alemanha. Para analisar as vantagens e desvantagens deste tipo de perfis em relação aos de alumínio, foi elaborada uma matriz de seleção de material, Tabela 42. Como a comparação foi realizada apenas entre dois materiais, pode ser usada uma matriz unitária, atribuindo 1 para o melhor material na característica e 0 para o pior. O material com maior índice é o mais adequado para a aplicação específica.

Tabela 42 – Comparação entre o perfil pultrudido em plástico reforçado com fibra de vidro e o perfil de alumínio

Material	E	$\sigma_y$	Condutividade térmica	Condutividade elétrica	$\rho$	Resistência à corrosão	€/kg	$\Sigma$ Total
Alumínio	1	1	0	0	0	0	0	2
GFRP	0	0	1	1	1	1	1	6

## 3.5 Projeto

### 3.5.1 Motor

O motor selecionado para o protótipo da PN, PM 8014 da Grosschopp, revelou um bom comportamento durante as ações de movimento da barreira. A barreira que sofre maior influência da rotação do motor durante o ciclo de abertura, movimenta-se mais rápido e de forma mais constante do que com o antigo motor, mas quando cortada a corrente, a barreira mantinha-se fixa na posição vertical, o que consistia numa falha não segura. Como o campo magnético dos ímãs permanentes é demasiado forte para a barreira executar um movimento de segurança, o técnico da Grosschopp foi contactado de modo a poder ajudar na solução do problema. O sugerido durante a troca de informações sobre a solução para o motor, foi a aplicação de um motor de indução DC 24 V, não normalizado, Figura 42. A diferença deste motor para o PM 8014, para além de um preço ligeiramente mais elevado, é que o campo magnético no rotor é provocado por uma bobine de enrolamento, e permite que em caso de corte de energia a barreira desça e execute uma falha segura.



Figura 42 - Exemplo de um dos motores de indução da Grosschopp (Arquivo Groschopp)

### 3.5.2 Redutor problema 3

Após a seleção do motor, tornou-se necessário o redimensionamento do redutor. O requisito para o projeto do redutor era manter a atual estrutura redutora. Então, a divisão de manutenção solicitou uma tampa protetora para evitar que os pedaços de cabos ou pós interferissem com o movimento das engrenagens e a contaminação do lubrificante. A introdução de um acumulador de óleo também foi um requisito pedido, para que o óleo não se espalhasse através da base do bloco do motor. Dentro das soluções consideradas para a modificação do redutor, propôs-se uma mudança na caixa de engrenagens: foram selecionados módulos compatíveis com a norma disponível no mercado, providos de menores larguras, que permitissem reduzir o número de engrenagens, alcançando uma relação de 208: 1, Tabela 43.

### 3.5.3 Solução

Assim, na Tabela 43 poderá ver-se quais as principais características do redutor após o redimensionamento.

### 3.5.4 Dimensionamento

#### 3.5.4.1 Força no dente

Para calcular o esforço em cada dente, primeiro procedeu-se ao cálculo da força tangencial no dente das engrenagens, seguindo a expressão (12)[26]:

$$F_t = \frac{Mt}{r_b} \quad (12)$$

onde  $Mt$ , é o momento tissor de cada engrenagem e  $r_b$  o raio primitivo de cada engrenagem. O resultado do cálculo está representado na Tabela 44

Tabela 43 – Características da solução escolhida

	Z roda	Z pinhão	Módulo (m)	rpm (N*I)	I = Zr/Zp	Mt = I x Mt (N·m)	
<b>Motor</b>	-	20	-	1	440	-	1,95
<b>1º Patamar</b>	120	17	1	2	71,47	6	11,73
<b>2º Patamar</b>	100	17	2	3	12,15	5,88	68,9
<b>3º Patamar</b>	100	Veio	3		2,07	5,88	405,73

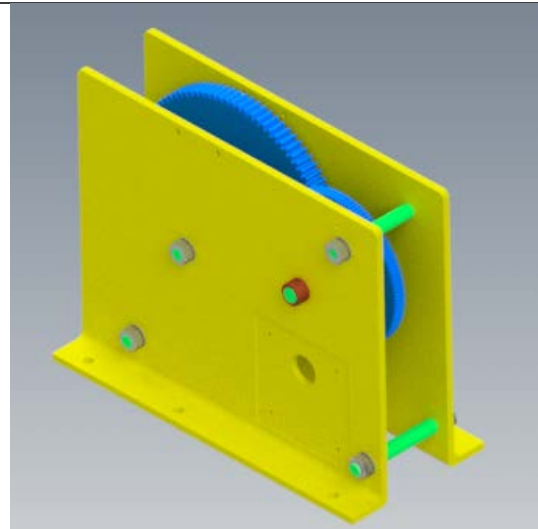


Tabela 44 - Cálculo da força tangencial nos diferentes dentados

Engrenagem	Força Tangencial (N)
<b>1</b>	0,195
<b>2</b>	0,1955
<b>3</b>	0,69
<b>4</b>	0,71
<b>5</b>	2,6
<b>Dentado do Veio</b>	3

### 3.5.4.2 Tensão no dente

Devido às modestas solicitações a que estão sujeitas as engrenagens, o cálculo do critério de Lewis, (13), foi aplicado para o componente mais crítico do redutor, Tabela 45, o dentado do veio.

$$\sigma_f = F_t \times \frac{Y_f \times Y_e \times Y_b}{m_n \times b} \left( \frac{K_v \times K_o}{K_L} \right) \times F_s \leq \sigma_{lim} \quad (13)$$

Tabela 45 - Dados para o cálculo da equação de Lewis para o dentado do veio

<b>F<sub>t</sub></b>	3 N
<b>Y<sub>f</sub></b>	2,4
<b>Y<sub>e</sub></b>	2
<b>Y<sub>b</sub></b>	0,833
<b>M<sub>n</sub></b>	3
<b>b</b>	30 mm
<b>K<sub>v</sub></b>	1
<b>K<sub>o</sub></b>	1
<b>K<sub>l</sub></b>	1,5
<b>F<sub>s</sub></b>	2
<b>σ<sub>lim</sub></b>	310 MPa

A tensão de flexão no dentado do veio é 0,17 MPa, pelo critério de Lewis, sendo a tensão de flexão admitida, considerando um coeficiente de segurança igual a 2, de 266,73 MPa. Este cálculo de tensão foi efetuado considerando 10<sup>6</sup> ciclos.

### 3.5.5 Proteção da superfície

O material utilizado para fabricar as engrenagens foi o aço C45E, submetido posteriormente a nitruração para melhorar a sua dureza superficial, reduzindo assim o desgaste, incrementando a resistência à fadiga e melhorando a resistência ao impacto na área de contato entre os dentes. As engrenagens serão cobertas por uma camada de *parcolubrite* (oxidação a negro), também para uma melhor fluidez da massa lubrificante durante o engrenamento.

### 3.5.6 Estudo de fiabilidade

Para o cálculo da fiabilidade [26], foi usada a taxa de falhas base das engrenagens. Este cálculo, feito a partir da expressão (14) permite-nos saber o número de falhas que podem ocorrer por cada conjunto de horas de operação das engrenagens, Tabela 46:

$$\lambda = \frac{(rpm \times 60) \times 1}{n^{\circ} \text{ rotações}}$$

Tabela 46 - Taxa de falhas das engrenagens por hora de operação

Engrenagem	rpm	Revoluções	$\lambda$ (Falhas/hora de operação)
1	428,8	$10^8$	$2,57 \cdot 10^{-4}$
2	71,47	$10^8$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
3	71,47	$10^8$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
4	12,15	$10^8$	$7 \cdot 10^{-6}$
5	12,15	$10^8$	$7 \cdot 10^{-6}$
Dentado do Veio	2,07	$10^8$	$1 \cdot 10^{-6}$

### 3.5.7 Análise FMEA do componente

Para avaliar as potenciais falhas do redutor no sistema de PN, Tabela 47, foram analisados os modos de falha para verificar se existe algum tipo de falha não segura.

Tabela 47 - Análise dos modos de falha do redutor

Modos de falha potenciais	Causas da falha	Métodos de deteção	Efeitos locais	Efeitos de nível superior
<i>Pitting</i>	Carga de contacto transmitida pelo filme lubrificante.	Inspeção visual (Analisar o estado da superfície dos dentes).	Danifica os dentes da engrenagem	Impede a transmissão de movimento até à barreira.

Fissura da raiz do dente	Desgaste da superfície de contacto e desgaste do dente.	Inspeção visual; análise de superfície por líquidos penetrantes.	Desgaste por flexão do dente.	Impede a transmissão de movimento até à barreira.
Fadiga de contacto	Falha do dente, fissuras.	Inspeção visual.	Desgaste de superfície.	Impede a transmissão de movimento até à barreira.
Desgaste a quente	Falha do dente, desgaste da superfície, fissuras.	Inspeção visual.	Tratamento térmico inadequado.	Impede a transmissão de movimento até à barreira.
Desgaste por abrasão	Vibrações, ruído, desgaste da superfície dos dentes.	Inspeção visual.	Contaminantes no sistema de lubrificação (Ex: limalhas ou pedaços de cabos).	Bloqueio do redutor, impede movimento da barreira.

### 3.5.8 Chaveta

A conexão entre o eixo e o redutor é feita por uma chaveta, Figura 43. Os modos de falha tornam este tipo de conexão mais confiável do que a solução previamente soldada. Estes garantem uma falha segura no mecanismo, o que significa que a barreira vai fechar em caso de fadiga ou desgaste. Como a velocidade do eixo não é alta (440 rpm, máximo), a chaveta é submetida a baixas cargas durante o ciclo do mecanismo (1 ciclo aberto e fechado, 10 segundos cada). Com o objetivo de evitar sobrecargas, foi projetado com um fator de segurança de 3. A engrenagem do eixo que se monta na conexão de chaveta é dividida em duas partes de acoplamento, para permitir inspeções de manutenção na área de conexão, garantindo uma montagem fácil e uma falha segura no caso de fadiga. A aplicação da conexão de chaveta permite um componente mais limpo e fácil de montar, permitindo fazer tarefas de manutenção e inspeção visual de uma maneira mais fácil e garantir também que não há problemas entre a chaveta e a engrenagem conectada ao eixo.



Figura 43 - Imagem do acoplamento por chaveta

### 3.5.8.1 Dimensionamento chaveta

Através dos dados presentes na Tabela 48, e usando as expressões (15) para o comprimento mínimo resistente da chaveta e, (16) para o cálculo do comprimento mínimo resistente ao esmagamento, foi escolhida uma chaveta normalizada com 40 mm de comprimento, aumentando ligeiramente o fator de segurança [26]:

$$L_s = \frac{4 \cdot F_t \cdot F_s}{\sigma \cdot d \cdot b} \quad (15)$$

$$L_b = \frac{4 \cdot F_t \cdot F_s}{K \cdot \sigma \cdot d \cdot H} \quad (16)$$

Tabela 48 - Dados para o cálculo da chaveta

<b>F<sub>t</sub> (força de torção)</b>	<b>420 kN</b>
<b>F<sub>s</sub></b>	<b>3</b>
<b>σ</b>	<b>200 MPa</b>
<b>d</b>	<b>48 mm</b>
<b>b</b>	<b>14 mm</b>
<b>K</b>	<b>1,5</b>
<b>H</b>	<b>9 mm</b>

O fator de segurança de 3 foi utilizado no cálculo da, tendo como resultado 37,5 mm para o comprimento mínimo resistente da chaveta a uma força de corte (15), e 38,89 mm para o mínimo comprimento resistente a um esforço de esmagamento (16).

### 3.5.8.2 *Proteção da superfície*

Este componente é protegido do aço inoxidável AISI 316 por vedação superficial (Loctite®), para evitar a corrosão galvânica. Se este tipo de proteção for considerado insuficiente para impedir a corrosão galvânica, será aplicada uma fita de proteção contra a corrosão galvânica.

### 3.5.8.3 *Análise FMEA do componente*

As chavetas atingem normalmente a rotura quando sujeitas a sobrecargas, para não danificar componentes conectados, o que faz com que este componente atue como um fusível mecânico em caso de esforços exagerados na zona do veio, Tabela 49.

Tabela 49 - Análise dos modos de falha da chaveta

<b>Modos de falha potenciais</b>	<b>Causas da falha</b>	<b>Métodos de deteção</b>	<b>Efeitos locais</b>	<b>Efeitos de nível superior</b>	<b>Medidas preventivas</b>
Falha por cisalhamento (corte)	Danos no componente de nível superior.	Inspeção visual; análise da superfície por líquidos penetrantes.	Veio fica livre.	Em caso de rotura, veio fica livre e a barreira baixa.	Teste de comportamento da chaveta, e avaliação do estado do componente.
Chaveta com folga	Chaveta solta no veio.	Ruído durante o movimento do redutor.	Escatel largo.	Veio fica livre e a barreira baixa.	Teste de comportamento da chaveta, e avaliação do estado do componente.
Chaveta danificada	Movimento axial da peça montada.	Ruído durante o movimento do redutor.	Carga axial excessiva.	Em caso de rotura, veio fica livre e a barreira baixa.	Teste de comportamento da chaveta, e avaliação do estado do componente.

### 3.5.9 Veio (problema 5)

As novas dimensões do eixo são as mesmas do anterior, com exceção do escatel e do material utilizado (aço inoxidável AISI 316), apresentando um melhor aspeto do que o anterior, o que terá um impacto diferente sobre os clientes e terá um melhor comportamento contra a corrosão. Pode ser visto como uma melhoria e não um novo componente, especialmente em países onde a corrosão compromete a função das PN. A diferença entre o eixo antigo e a nova solução (Figura 44) é que a nova cria um maior impacto através de uma melhor aparência e melhor resistência à corrosão. A solução de opção pelo aço inoxidável AISI 316 com as mesmas dimensões do eixo está atualmente em estudo para ser aplicada em futuros projetos.

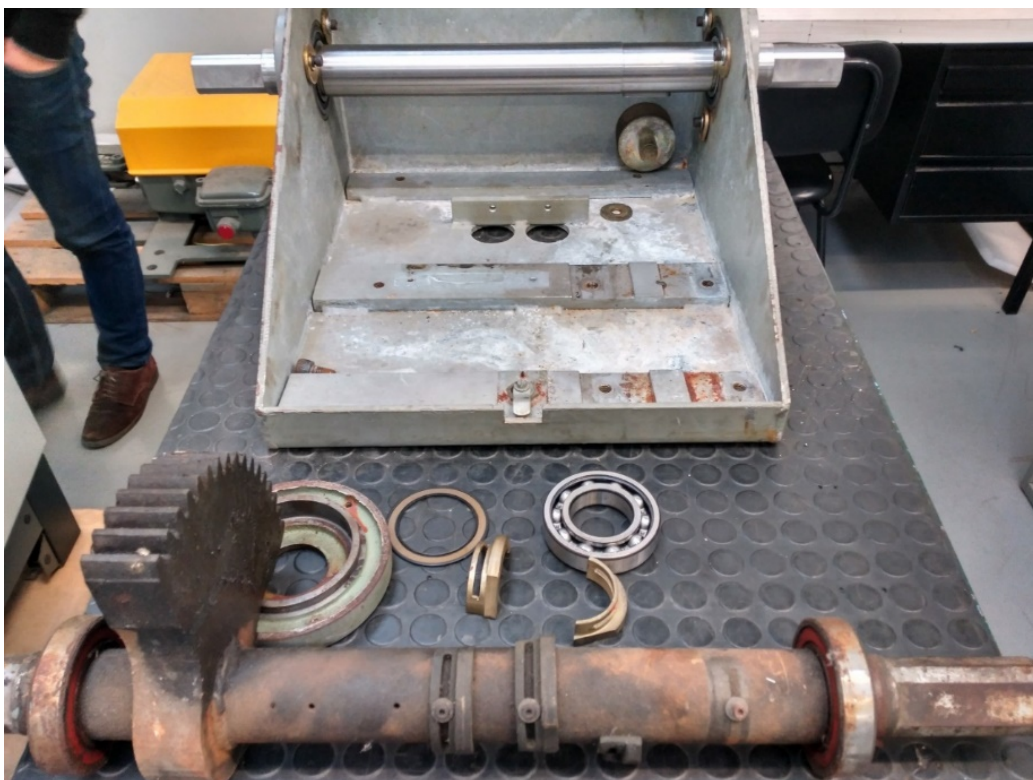


Figura 44 – Comparação entre o novo veio em AISI 316 e o antigo, após retirada do terreno

#### 3.5.9.1 Dimensionamento

Utilizando os critérios de cedência (17) e fadiga (18), foram determinadas as tensões máximas e admissíveis a que o veio poderá estar sujeito [26].

$$\sigma_{\max}^{VM} = \frac{16}{\pi d^3} \times \sqrt{\left(\frac{N_x \cdot d}{4} + M_f\right)^2 + 3M_t} \leq \frac{\sigma_{ced}}{F_s} \quad (17)$$

$$\sigma_a^{VM} + \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_R}\right) \times \sigma_m^{VM} \leq \frac{\sigma_f}{F_s} \quad (18)$$

Tabela 50 - Dados para o cálculo da fadiga no veio

<b>d</b>	48 mm
<b>N<sub>x</sub></b>	0 N
<b>M<sub>f</sub></b>	64,53 N·m
<b>M<sub>t</sub></b>	400 N·m
<b>F<sub>s</sub></b>	2
<b>σ<sub>a</sub><sup>VM</sup></b>	88,63 MPa
<b>σ<sub>ced</sub></b>	200 MPa
<b>σ<sub>f</sub></b>	156,12 MPa
<b>σ<sub>r</sub></b>	579 MPa
<b>σ<sub>m</sub><sup>VM</sup></b>	31,90 MPa

Os dados utilizados para o cálculo da fadiga no veio, conforme mostrado na Tabela 50, permitiram analisar que o veio está sujeito a uma tensão máxima de corte de 92,2 MPa, que é menor do que o admissível de 100 MPa. Em relação ao comportamento de fadiga, está sujeito a uma tensão de 97,3 MPa, sendo a carga admissível de 104,1 MPa.

### 3.5.9.2 *Tratamentos de superfícies*

Como o veio é constituído por aço inoxidável AISI 316, a única proteção de superfície que será aplicada será o adesivo Loctite® 212 nas zonas de contacto com a chaveta e na zona onde serão aplicadas as cames.

### 3.5.9.3 *Análise de elementos finitos*

A aplicação de elementos finitos da *Autodesk Inventor*® para veios, permitiu uma análise do comportamento de alguns dos elementos mais críticos, como um veio em aço inoxidável ou um braço que suporta a haste em ambos os lados facejados.

Nas subsecções seguintes são mostrados os diagramas de esforços e deformações de cada um dos componentes considerados críticos.

### 3.5.9.4 Força de corte

Na Figura 45, podemos observar que a reação produzida pelos rolamentos à força provocada pelo peso da haste e, dos seus elementos de ligação ao veio, é superior, indicando que o veio não se deforma com a aplicação da barreira em ambos os lados facejados.

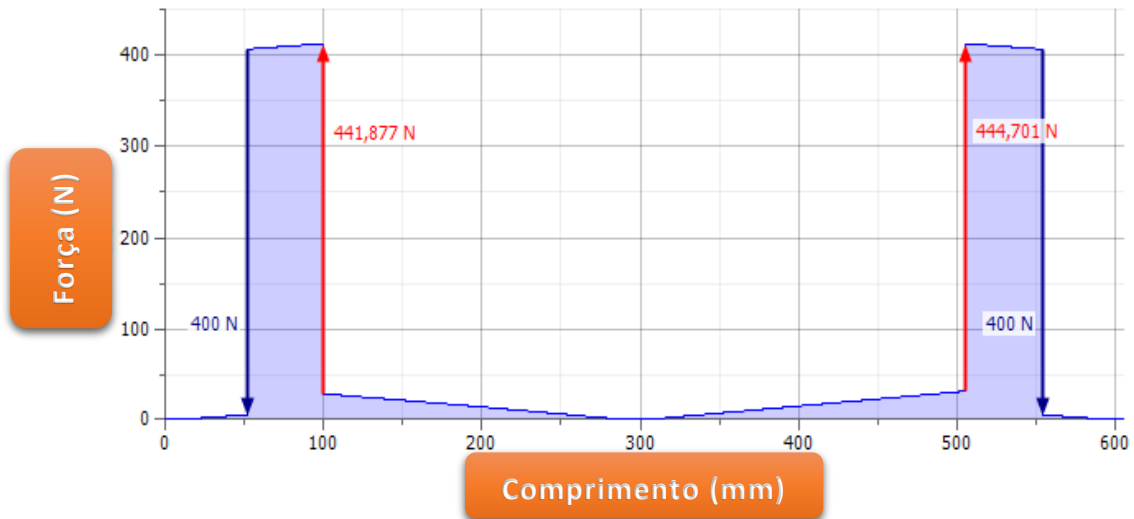


Figura 45 – Simulação do comportamento do veio ao efeito de corte provocado pelo peso da barreira, ao longo do seu comprimento.

### 3.5.9.5 Desvio do veio

O desvio máximo, Figura 46, indica que com a aplicação da barreira em ambos os lados facejados, o veio mantém um desvio na ordem de um micrómetro, o que viabiliza a aplicação de uma barreira duplamente apoiada no veio.



Figura 46 – Simulação do desvio do veio provocado pelo peso da barreira

### 3.5.9.6 *Momento fletor*

A Figura 47, indica que a zona do veio onde o momento fletor é máximo, fica situada do lado oposto à ligação entre o redutor e o veio, no ponto ligeira mente acima de 500mm.

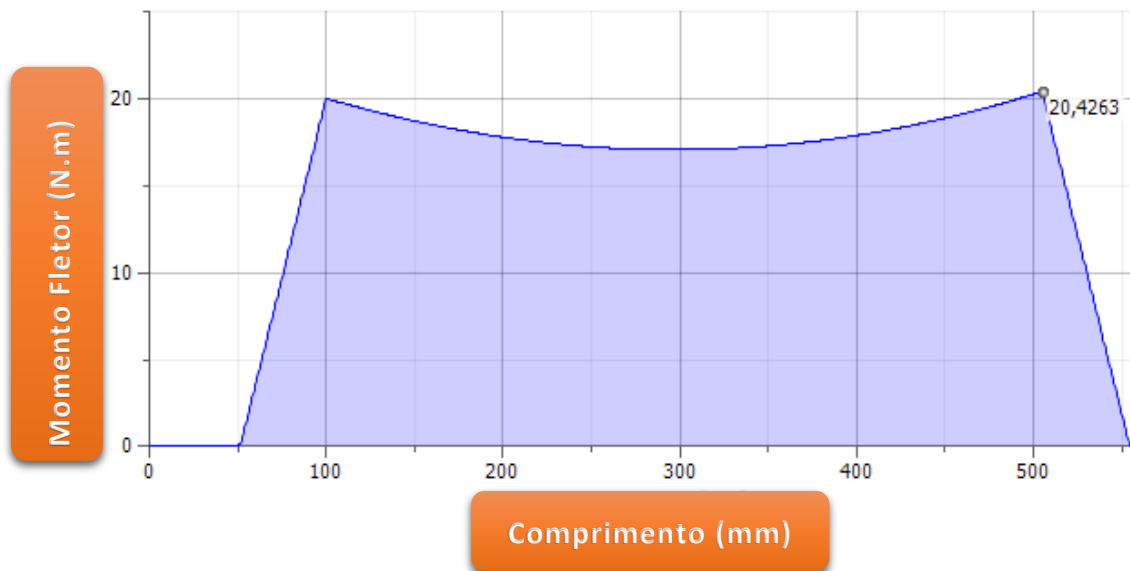


Figura 47 - Simulação da flexão ao longo do comprimento do veio provocada pelo peso da barreira

### 3.5.9.7 *Tensão de torção*

O gráfico da Figura 48 indica a tensão de torção máxima, provocada pelo momento torsor de 400 N·m. A zona de tensão máxima coincide com a da



Figura 48 - Simulação da tensão de torção ao longo do comprimento do veio provocada pelo peso da barreira

### 3.5.9.8 *Tensão reduzida*

A tensão reduzida, Figura 49, é a combinação das tensões de torção, flexão e corte, e indica a zona crítica do veio. É nesta zona que será calculado o diâmetro mínimo para os parâmetros estabelecidos.



Figura 49 – Simulação da tensão reduzida

### 3.5.9.9 *Diâmetro ideal*

A simulação do cálculo do diâmetro ideal para o veio, Figura 50 tendo em conta os esforços aplicados, indica que na zona crítica, ligeiramente acima dos 500 mm, o diâmetro mínimo para o veio é de 33,4 mm. Como no veio proposto em aço inoxidável AISI 316 na mesma zona tem 45 mm, pode-se afirmar que o veio está sobredimensionado, até para uma aplicação da barreira apoiada nos dois lados facejados do veio.



Figura 50 – Simulação do cálculo para o diâmetro ideal do veio, ao longo do comprimento do veio

### 3.5.9.10 *Conclusões da análise de elementos finitos*

Na análise por Elementos Finitos foi tido em conta o peso de uma barreira de alumínio, o que permitiu confirmar que o veio está sobredimensionado, quando para uma aplicação de um braço apoiado só de um lado do mecanismo. O facto de o veio não ter nenhum problema de fadiga ou algum tipo de desgaste mecânico durante os 30 anos de operação, justifica a continuidade do sobredimensionamento, apesar da mudança de material para aço inoxidável AISI 316. Também se concluiu com esta análise que uma aplicação de uma barreira em Y poderá ser aplicada, mas será necessária a redução do peso ou alteração do tipo de material constituinte da haste, de modo a não sobrecarregar o veio, e provocar flexão excessiva.

### 3.5.9.11 *Estudo da fiabilidade*

O estudo de fiabilidade do veio foi feito de modo a calcular pela expressão (19) e pelos dados da Tabela 51 a velocidade crítica do veio [26].

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g(W_1 y_1)}{W_1^2}}$$

Tabela 51 - Dados para o cálculo da velocidade crítica do veio

<b>g</b>	<b>9,81 m/s<sup>2</sup></b>
<b>W<sub>1</sub> (peso da engrenagem)</b>	<b>80 N</b>
<b>y<sub>1</sub> (flexão)</b>	<b>6.5x10<sup>-9</sup> mm</b>

A velocidade crítica do eixo é de 6182,4 ciclos/s, quando a velocidade máxima atingida pelo eixo em serviço é 0,05 ciclos/s. Portanto, o veio nunca atinge a sua velocidade crítica durante o funcionamento da PN. Estando sobredimensionado, os problemas principais do veio serão os de controlo da oxidação.

### 3.5.9.12 *Análise FMEA do componente*

Uma análise FMEA do veio foi realizada, para interpretar as potenciais causa e efeitos de falha do componente, Tabela 52.

Tabela 52 - Análise dos modos de falha do veio.

<b>Modos de falha potenciais</b>	<b>Causas de falha</b>	<b>Métodos de deteção</b>	<b>Efeitos locais</b>	<b>Efeitos de nível superior</b>
Flexão do veio	Vibrações, rolamentos danificados		Elevada carga no rolamento, momento elevado, falha de rolamento	PN não se movimenta
Flexão do veio excessiva	Possível avaria do veio; veio danificado, caixa de velocidades	Inspeção visual	Carga dinâmica no veio; velocidade crítica excedida; carga desequilibrada;	Barreira não se movimenta
Desalinhamento	Vibrações	Ruído durante o movimento; mau acoplamento dos rolamentos	Excesso de carga, montagem imprópria; rolamentos gastos	Desgaste do rolamento
Superfície danificada	Falha no encaixe dos rolamentos	Ruído durante o movimento	Corrosão, contaminantes, processo de fabrico, aumento das temperaturas de funcionamento;	Desgaste na zona de acoplamento do veio
Fratura	Rolamento danificado	Empeno do rolamento	Tensões na chaveta, velocidade excessiva, elevado momento torsor	PN não se movimenta

### 3.5.10 Rolamentos (problema 6)

Dependendo do peso das barreiras e contrapesos, as esferas danificam a pista de rolamento num período de tempo mais curto do que o esperado. O uso de rolamentos de rolos resolve o problema de desgaste prematuro da pista de rolamento e pode ser aplicado com barreiras mais pesadas e mais longas.

### 3.5.10.1 *Estudo de fiabilidade*

Para o estudo de fiabilidade dos rolamentos, foi utilizada a expressão (20), com os dados contidos na Tabela 53. Todos os rolamentos são fabricados para 90% de fiabilidade[26].

$$L_{10} = \frac{N_c}{60n} = \frac{10^6 \times c^3}{60 \times n \times p^3} \quad (20)$$

Tabela 53 - Tabela de dados para ao cálculo da fiabilidade dos rolamentos

<b>C (capacidade dinâmica)</b>	5660 N
<b>n (rpm)</b>	2,07
<b>p (força radial equivalente)</b>	3900 N

No caso dos rolamentos de rolos, o número de ciclos é  $L_{10} = 3,74 \times 10^{11}$ . A este valor corresponde um tempo de funcionamento de  $3,74 \times 10^{12}$  horas. Este número de horas nunca será cumprido na totalidade, pois os rolamentos são substituídos durante as manutenções preventivas a cada seis meses.

### 3.5.10.2 *Análise FMEA do componente*

A análise de modos de falha do componente foi efetuada, Tabela 54, para que no caso de falha possamos saber determinar como detetar a falha e prever o efeito no componente diretamente dependente, ou no sistema.

Tabela 54 - Análise dos modos de falha dos rolamentos

<b>Modos de falha potenciais</b>	<b>Causas de falha</b>	<b>Métodos de deteção</b>	<b>Efeitos locais</b>	<b>Efeitos de nível superior</b>
Dano por fadiga	Cargas elevadas durante um largo período de tempo	Inspeção visual	<i>Spalling</i> do rolo	
Ruído no rolamento	Perda de lubrificante, vedantes de rolamento danificados, agentes corrosivos		Desgaste da superfície, <i>Micro Pitting</i>	

Corrosão do rolamento	Bloqueio do rolamento	Inspeção visual	Contaminação do lubrificante	Bloqueio do rolamento, Barreira não se movimenta
Vibração do rolamento	Carga elevada, mau alinhamento, chumaceira inadequada		<i>Fretting</i> , <i>Pitting</i> nas superfícies	

### 3.5.10.3 *Chumaceira (problema 7)*

A solução para aumentar a vedação da chumaceira, consistiu na modificação da mesma de modo a ter vedações para manter a água e pó fora do rolamento, Figura 51. A nova chumaceira é produzida em aço C45E, e como tratamento de superfície é zincada e passivada. No novo *design*, a chumaceira foi dividida em duas peças, uma tampa para fixar as vedações e a parte que suporta o rolamento. As vedações deste novo *design* da chumaceira incluem um *O-ring*, que para além de promover a estanqueidade onde a tampa é acoplada, também ajuda na fixação da mesma ao apoio do rolamento. A outra parte da chumaceira tem uma depressão, onde é colocado um *V-ring* acoplado ao veio, para que as infiltrações por capilaridade sejam mantidas longe dos corpos rolantes. Para efetuar operações de manutenção, basta ao operador retirar os quatro parafusos fixadores da tampa exterior e inspecionar com a ajuda de uma lanterna e uma lupa o estado das vedações, e no caso de as vedações se encontrarem secas, aplicar massa lubrificante, de modo a relubrificar o sistema. Ao nível da montagem e desmontagem no terreno, esta chumaceira é mais amiga do operador, pois para substituição dos consumíveis (*O-ring* e *V-ring*), não é necessária a desmontagem completa do componente.

No total, esta nova chumaceira contém três tipos de vedações diferentes, o *O-ring*, que não permite a entrada de água pelas frinchas da tampa, o *V-ring*, que não permite a infiltração de água por capilaridade pelo veio até ao rolamento, e no final, duas calhas, que em caso de passagem de água até à zona do rolamento, esta escoam diretamente para o mecanismo, que neste caso é uma situação com menor gravidade, quando comparada com infiltrações nos rolamentos.

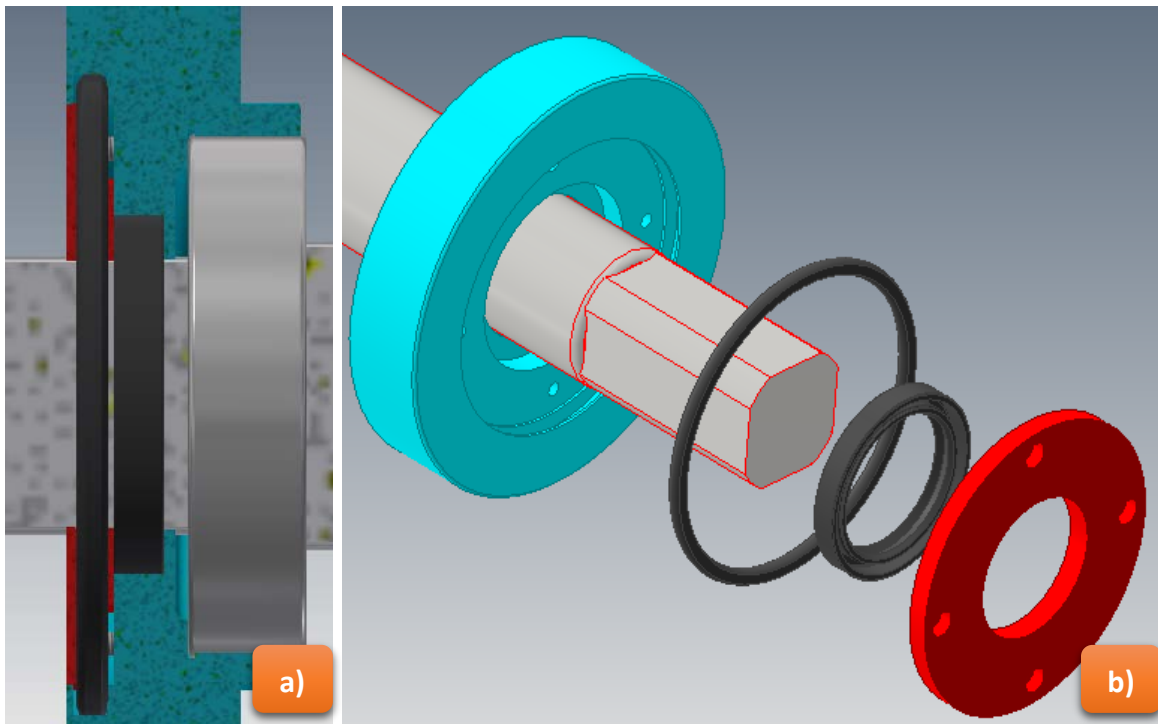


Figura 51 – Esquema da estrutura da “nova” chumaceira em corte (a), e em vista explodida (b)

#### 3.5.10.4 *Análise FMEA do componente*

A análise de modos de falha do componente foi efetuada, Tabela 55, para que no caso de falha se poder determinar como detetar a falha e prever o efeito no componente diretamente dependente, ou no sistema.

Tabela 55 - Modos de falha dos elementos de retenção

Modos de falha potenciais	Causas de falha	Métodos de deteção	Efeitos locais	Efeitos de nível superior
Escoamento	Desgaste	Inspeção Visual	Contaminantes, Desalinhamento, Vibrações, Mau acabamento superficial	Infiltração de água provoca a inutilização do

	Deformação elástica, Deformação do vedante	Inspeção Visual	Temperatura extrema, Desalinhamento, Excentricidade do elemento vedante, Excesso de carga, Compressão a força constante	rolamento e à entrada de água no mecanismo
Escoamento	Danificação de superfície, Fragilização	Inspeção Visual	Lubrificação inadequada, Contaminantes, Degradação do vedante, Períodos entre utilização muito largos, Exposição atmosférica (Ozono), Temperatura excessiva)	Infiltração de água provoca a inutilização do rolamento e a entrada de água no mecanismo
	Fluência (Deformação Plástica)	Inspeção Visual	Pressão do fluido, Degradação do material, Expansão e contração térmica	
	Compressão a força constante		Excesso de pressão para fixar o componente, Vulcanização incompleta, Encruamento, Altas temperaturas	
Escoamento	Erro de montagem		Chanfro insuficiente, Quinas vivas no acoplamento, Proteção inadequada	

### 3.5.11 Pedestal (problema 8)

Projetada para ter uma melhor resistência à torção, o novo pedestal tem uma porta de altura total, permitindo que a equipe de montagem tenha mais espaço para conectar cabos, assim como protege o operador de detritos projetados do caminho-de-ferro. Os furos na parte superior, Figura 52 b, e os perfis quadrados abertos foram adotados não só para suportar caixa do mecanismo (os superiores), mas também para permitir que o fluido de galvanização passe por toda parte todo o perfil e garanta uma melhor proteção. O novo pedestal é mais resistente, mais amigável ao operador relativamente à velha coluna devido à fácil manutenção de componentes internos, à sua fixação que evita o vandalismo.

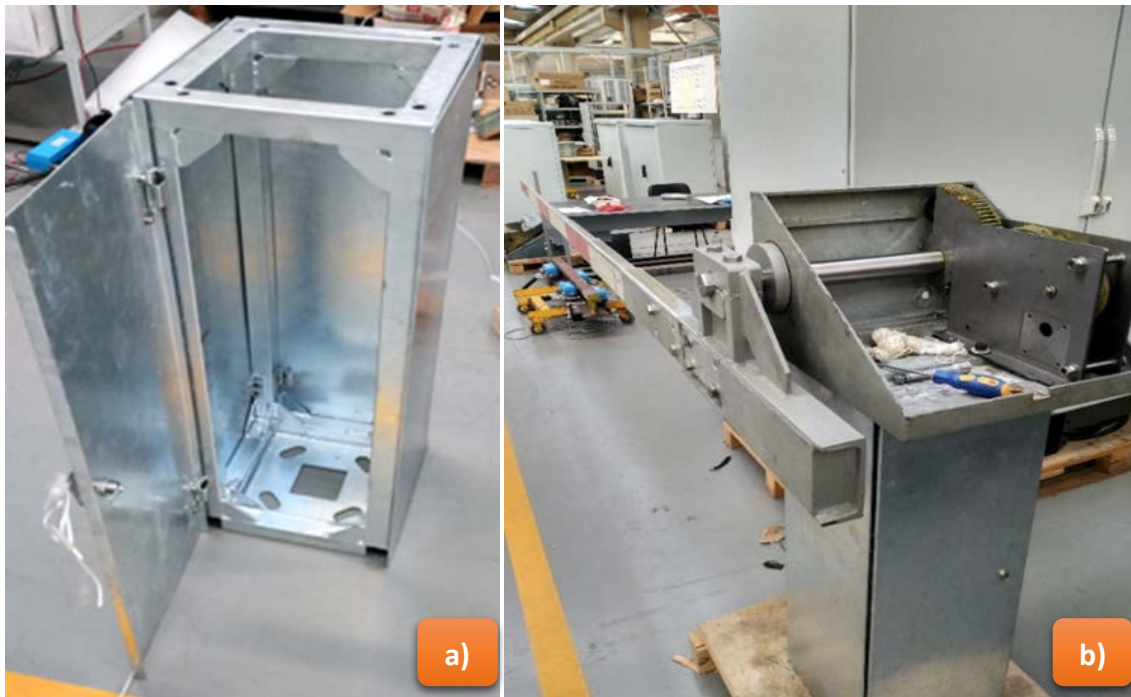


Figura 52 – (a) Antigo pedestal em comparação o novo (b); o novo pedestal em conjunto com o mecanismo e haste de alumínio (b)

### 3.5.12 Barreira

Nos testes realizados com perfil GFRP, Figura 53, foi observada na barreira alguma flexão na vertical e, por outro lado, uma grande flexão lateral, quando sofria uma solicitação perpendicular ao perfil pultrudido. Na parte respeitante ao movimento da barreira no novo e no antigo mecanismo, o comportamento da haste em perfil pultrudido permite um movimento ligeiramente mais rápido do que com a haste em alumínio. Quando atinge a posição de paragem, após movimento, tem grande flexão lateral.

Segundo os cálculos efetuados para um perfil retangular pultrudido, a flexão vertical é de 4,5 mm e a flexão lateral acima de 40 mm, considerando a resistência do vento. Este efeito foi simulado através do *software Autodesk Inventor®*, pelo Método de Elementos Finitos, Figura 53. Para o esforço causado pela ação do vento, foi tido em

conta o valor de  $50 \text{ kgf/m}^2$  ( $490.3 \text{ N}\cdot\text{m}$ ). Dentro das soluções fabricadas pela ALTO, fornecedor do perfil em teste, existem soluções que poderão atenuar o efeito de flexão lateral, como por exemplo a adição de cortiça ou poliuretano no interior do perfil, que aumenta a inércia para que o efeito do vento e as oscilações quando atinge a posição de paragem após movimento, sejam mais atenuadas. Uma outra solução poderá estar no tipo de resina aplicado no perfil. A utilização de uma resina vinil-éster, ao invés de uma epóxi, aumenta consideravelmente a sua resistência. A terceira solução para a haste passa por aplicar um perfil dentro do perfil pultrudido, de modo a aumentar a sua inércia, e assim aumentar a sua resistência às oscilações e flexão lateral.

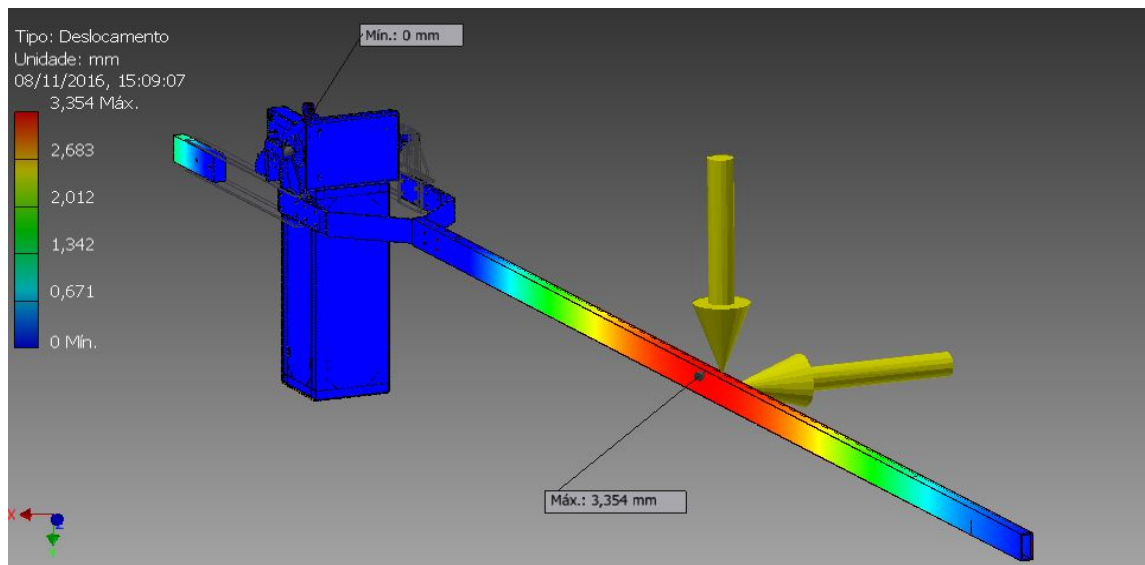


Figura 53 – Simulação de E.F. da barreira com os esforços do peso próprio e vento lateral

## 3.6 Orçamentação

### 3.6.1 Estudo do custo

Na Tabela 56, estão especificados os vários orçamentos solicitados para as diferentes peças para o protótipo da PN. De modo a obter o melhor preço, foi considerado pedir orçamento peça a peça a várias empresas, e considerada a hipótese de aquisições parciais a cada fornecer, pelo que a análise deverá ser realizada com base num orçamento misto, referente à soma dos componentes a adquirir. A distribuição pelos fornecedores foi realizada consoante a especialidade de fabrico de cada um. Para alguns dos componentes, principalmente a chumaceira, foi necessária a deslocação à empresa TPM, na Maia, para não só haver uma redução do preço, como para também ouvir por parte do fornecedor do atual mecanismo considerações sobre o processo de fabrico e tratamentos de superfície, assim como sugestões para uma futura evolução de outros componentes.

Tabela 56 - Orçamento dos componentes

Componente	PREÇO UNITÁRIO Frezimaia	PREÇO UNITÁRIO Cubotonic	PREÇO UNITÁRIO Tornitrofa	PREÇO UNITÁRIO Turnmilling, Lda	PREÇO UNITÁRIO EIB	Fisola	TPM	Orçamento misto
Engrenagem 1	96,50 €	93,00 €	34,00 €	35,00 €		-		34,00 €
Engrenagem 2	152,50 €	160,00 €	16,00 €	45,00 €	--	-		16,00 €
Engrenagem 3	102,50 €	133,00 €	26,00 €	37,50 €	--	-		26,00 €
Engrenagem 4	176,50 €	185,00 €	35,00 €	116,00 €	--	-		35,00 €
Engrenagem 5	144,50 €	137,00 €	30,00 €	67,50 €	--	-		30,00 €
Tampa do redutor	82,50 €	37,26 €	24,00 €	56,00 €	14,22 €	-		14,22 €
Carter do Redutor	78,50 €	42,11 €	15,00 €	43,00 €	12,15 €	-		12,15 €
Suporte engrenagem 2	97,60 €	34,74 €	48,00 €	52,00 €	27,54 €	-		27,54 €
Suporte lado motor	97,60 €	40,32 €	48,00 €	52,00 €	28,98 €	-		28,98 €
Eixo de Mecanismo de Meia Barreira 1	32,50 €	15,00 €	18,00 €	12,00 €	--	-		12,00 €
Eixo de	32,50 €	25,00 €	31,00 €	14,00 €	--			14,00 €

Mecanismo de Meia Barreira 2								
Eixo de Mecanismo de Meia Barreira 3	89,50 €	43,50 €	36,00 €	23,00 €	--			23,00 €
Eixo de Mecanismo de Meia Barreira 4	37,50 €	20,00 €	16,00 €	12,00 €	--			12,00 €
Veio Mecanismo; Dentado do veio peça 1	168,50 €	190,00 €	54,00 €	58,00 €	--			54,00 €
Veio Mecanismo; Dentado do veio peça 2	96,00 €	395,00 €	105,00 €	380,00 €	--			105,00 €
Veio Mecanismo	456,50 €	490,00 €	111,00 €	273,00 €	--			111,000 €
Subtotal	1.941,70 €	2.040,93 €	647,00 €	1.276,00 €	82,89 €			554,89 €
Pedestal							212,50 €	
Fusivel							35,70 €	35,70 €
Chumaceira							81,5 *2 €	163 €
Total								966,09 €



### 3.7 Análise económica e retorno financeiro

O preço final do protótipo foi de 966 €, Tabela 56, isto sem contar com a haste de perfil pultrudido. A haste foi fornecida como amostra para o estudo efetuado, e o seu futuro preço está estimado em aproximadamente 150 €. Se este valor, juntamente com rolamentos e casquilhos, for somado ao resto do protótipo, temos uma PN cujos componentes mecânicos rondam os 1300 €, baixando o preço dos componentes relativamente ao projeto da antiga PN.

O pedido de uma só peça de cada componente aos fornecedores tem uma influência fortemente negativa no preço final do protótipo. Caso se passe para uma produção em série, com um número de 100 ou 200 PN's por ano, o preço tenderá a baixar significativamente.

No caso das chumaceiras, o preço subiu consideravelmente (+30 €, para 81,5 € + consumíveis), mas devido aos recentes problemas de infiltrações de água, e como consequência do empeno de rolamentos, o que é uma falha grave do sistema, a adoção deste sistema torna-se obrigatória. Estes componentes vão ser aplicados como um melhoramento de meia vida nas PN's atualmente ao serviço da empresa Infraestruturas de Portugal já em 2017, com um preço a definir pela EFACEC. Neste caso, o retorno financeiro deve ser sentido num prazo mais curto que os restantes componentes.

O perfil de PRFV tem vantagens especificamente em relação à padronização de preços e processos. A redução de custos entre o PRFV e o alumínio é de cerca de 800 € para cada perfil, na maioria dos casos cada sistema de PN tem duas PN, pelo que a poupança é de cerca de 1600 € por sistema de PN, o que torna esta solução consideravelmente mais viável do que a de alumínio. Como o processo de pultrusão permite produzir meio metro de perfil PFRP por hora, o tempo de entrega é também bastante satisfatório, estando perfeitamente dentro dos prazos usualmente requeridos para a entrega dos sistemas de PN.



# CONCLUSÕES

## 4.1 CONCLUSÕES



## 4 CONCLUSÕES

A metodologia de Análise do Valor aplicada neste equipamento permite à equipa de desenvolvimento analisar e adquirir conhecimentos a partir de diferentes soluções que poderiam ser aplicadas neste tipo de dispositivos que permite manter o mesmo desenho desde 1980, mas melhorar drasticamente o espaço disponível na caixa da coluna e conduz a um custo considerável menor, sem reduzir os níveis de segurança exigidos. Assim, a aplicação da metodologia permite-nos aumentar o valor do produto da EFACEC, melhorando as funções e o comportamento da PN em vários ambientes.

As mudanças no projeto mecânico da PN podem ser aplicadas como operações de manutenção em PN já em funcionamento, como por exemplo os eixos, rolamentos e colunas torcidas, o que significa que os clientes podem aumentar a capacidade dos seus equipamentos sem grandes reformulações ou custos. O estudo de um novo material para a barreira mostrou ser uma solução inovadora e economicamente viável mas, sendo ainda necessário sujeitar estes novos componentes a testes no terreno para cumprir com os padrões de normas de segurança e, concluir com sucesso o necessário estudo de fiabilidade. Uma vez que estes equipamentos são concebidos para mais de 30 anos de vida, o sistema poderá estar em evolução contínua e sofrer melhorias sistemáticas, tanto no campo da mecânica como da eletrónica.

Assim, foram estudadas e implementadas melhorias importantes nos mecanismos e barreiras, desenvolvendo soluções modernas, mantendo o produto com uma aparência similar mas, melhorando a resistência à corrosão, a funcionalidade, adaptando-se à normalização de componentes, diminuindo o custo, tornando o sistema mais sustentável e reduzindo os custos globais. Assim, a PN não pode ser considerada um produto acabado, mantendo constante a evolução, preservando sempre os mesmos princípios de segurança.



**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES  
DE INFORMAÇÃO**



## 5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

### Referências

1. R. Bowood (1961). *The Story of Railways*, Ladybird Books, London, ISBN: 9780721401331.
2. José Ribeiro da Silva(2008), *Os Comboios em Portugal*»,Terramar ISBN: 9789727104109
3. J. F. C. Tavares (2000), *100 obras de engenharia civil no século XX: Portugal, Ordem dos Advogados*, ISBN: 9789729723179
4. A. W. Evans (2011). *Fatal accidents at railway level crossings in Great Britain 1946-2009, Vol. 43(5), 1837-1845, doi: 10.1016/j.aap.2011.04.019.*
5. S. H. and P. Van Der Mark (2008), *Level Crossings*, Ian Allan Ltd, ISBN: 9780711033085
6. Ian Prosser (2011), *Level Crossings : A guide for managers , designers,and operators*, Office of Rail Regulation, [Http://www.orr.gov.uk/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0020/22457/annual-health-and-safety-report-july-2016.pdf](http://www.orr.gov.uk/__data/assets/pdf_file/0020/22457/annual-health-and-safety-report-july-2016.pdf), *acedido em 21/4/2016*
7. J.Dehon (2016), *Rapport annuel de sécurité 2015 Infrabel*, Bruxelles, [http://www.infrabel.be/sites/default/files/documents/rapport\\_annuel\\_de\\_securite\\_2015.pdf](http://www.infrabel.be/sites/default/files/documents/rapport_annuel_de_securite_2015.pdf), *acedido em 5/11/2016*
8. Annual Report(2016)., *AnnualReport2015-2016, The Community of European Railway and InfrastructureCompanies*,[http://www.cer.be/sites/default/files/CER%20AR%202016\\_web.pdf](http://www.cer.be/sites/default/files/CER%20AR%202016_web.pdf),*acedido20/1/2017*
10. Ian Prosser (2016), *ORR's Annual Health and Safety Report of Performance on Britain's Railways:2015.16*,Office.of.Rail.and.road,[http://www.orr.gov.uk/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0020/22457/annual-health-and-safety-report-july-2016.pdf](http://www.orr.gov.uk/__data/assets/pdf_file/0020/22457/annual-health-and-safety-report-july-2016.pdf), *acedido em 10/12/2016*
11. D. J. Smith (2011), *Reliability Maintainability and Risk*, Butterworth-Heinemann, ISBN: 9780080969022.,
12. B. S. Dhillon (2004), *Reliability, Quality and Safety for Engineers*, Taylor Francis Ltd, United Kingdom, ISBN: 9780849330681
13. Bryan Dodson(2006), *The Weibull Analysis Handbook ,2nd edition*, ASQ Quality Press, ISBN: 9780873896672
14. Departement of defense, (2005), *DoD Guide for Achieving Reliability, Availability, and Maintainability*,<https://kscddms.ksc.nasa.gov/Reliability/Documents/HandbookofMechanicalReliability.pdf>, *acedido em 8/7/2016*
15. C. S. Carlson,(2014)., *Understanding and Applying the Fundamentals of FMEAs,Annual ReliabilityandMaintainabilitySymposium*,[http://www.reliasoft.com/pubs/2014\\_RAMS\\_fundamentals\\_of\\_fmeas.pdf](http://www.reliasoft.com/pubs/2014_RAMS_fundamentals_of_fmeas.pdf), *acedido em 15/9/2016*
16. G. M. P. Simões, (2008), *RAMS analysis of railway track infrastructure, tese de mestrado, InstitutoSuperiorTécnico*,<https://www.mitportugal.org/about/documents/transportation-systems-1/theses/244-rams-analysis-of-railway-track-infrastructure/file>, *acedido em 10/9/2016*
17. Ministry of Transport (1968), *Report of the Public Inquiry into the Accident at Hixon Level*

*Crossing on January sixth*, <http://www.railwaysarchive.co.uk/docsummary.php?docID=74>,  
acedido em 5/10/2016

18. A. Birolini (2010), *Reliability Engineering - Theory and practice*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, *Isbn: 9783662054093*.
19. L. S. Tey, S. Zhu, L. Ferreira, e G. Wallis, *Measuring driver responses at railway level crossings*, *Accid. Anal. Prev.*, vol. 71, pp. 177–182, 2014, *Doi: 10.1016/j.aap.2011.06.003*
20. H. Pham (2003), *Handbook of Reliability Engineering*, Springer-Verlag London, *Isbn: 9781852338411*.
21. T. Nakagawa (2008), *Advanced Reliability Models and Maintenance Policies*, Springer London, *Isbn: 9781848002944*.
22. Carl S. Carlson (2012), *Understanding the Fundamental Definitions and Concepts of FMEAs*, John Wiley & Sons, *DOI: 10.1002/9781118312575.ch3*
23. H. Silva Serra (1989), *Análise do Valor - um metodo para a melhoria da qualidade, redução de custos, abertura à inovação e melhoria da comunicação*, Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, Lisboa
24. SAVE.International.Value.Standard (2015), *Value Methodology,value management*, [http://c.ymcdn.com/sites/www.value-eng.org/resource/collection/5691B39A-F10F-480A-885F-B44AAB59F2E7/VM\\_STANDARD\\_MAR-2015.pdf](http://c.ymcdn.com/sites/www.value-eng.org/resource/collection/5691B39A-F10F-480A-885F-B44AAB59F2E7/VM_STANDARD_MAR-2015.pdf), *acedido 24/10/2016*
25. ISQ - Instituto Português da Qualidade (2003), *Norma Portuguesa NP EN 12973 - Gestão pelo Valor*.
26. M. F. Spotts, T. E. Soup, (1998), *Design Of Machine Elements*, 7th ed., Prentice Hall, ISBN: 0137261675



