



DIMENSIONAMENTO DE UMA ESTRUTURA METÁLICA PARA SUPOORTE DE UM TRANS- RUPTER

JOÃO PEDRO LOPES FERNANDES

outubro de 2019

DIMENSIONAMENTO DE UMA ESTRUTURA METÁLICA PARA SUPORTE DE UM TRANS-RUPTER

João Pedro Lopes Fernandes

1130546

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



DIMENSIONAMENTO DE UMA ESTRUTURA METÁLICA PARA SUPORTE DE UM TRANS-RUPTER

João Pedro Lopes Fernandes

1130546

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 Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho.

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Manuel Jorge Dores de Castro

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor José Duarte Ribeiro Marafona

Professor Auxiliar, FEUP

AGRADECIMENTOS

Este trabalho só foi possível pela colaboração de várias pessoas e instituições, às quais gostaria de apresentar os meus sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador, Engenheiro Raul Campilho, pela colaboração, dedicação, compreensão, disponibilidade e partilha de conhecimentos ao longo de todo o trabalho.

À EFACEC, que se disponibilizou para ceder um tema bastante pertinente que se tornou no ponto de partida para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Engenheiro Tiago Lmares pelo auxílio prestado e partilha de conhecimentos ao longo deste percurso.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), pelos anos de formação que me permitiram crescer a nível profissional.

Aos meus pais, que sempre me apoiaram em todos os momentos e que possibilitaram a minha formação.

À minha namorada, pelo apoio, palavras de motivação e paciência durante este caminho. Agradeço ainda por me fazer acreditar que eu sou capaz e que tenho capacidades para fazer o melhor que consigo e acreditar que posso ainda vir a ser melhor.

Aos meus amigos, que me apoiaram durante a realização deste trabalho e por estarem presentes ao longo de todo o percurso.

PALAVRAS CHAVE

Setor energético, proteção energética, dimensionamento de estruturas, Método de Elementos Finitos, Trans-rupter.

RESUMO

O setor energético ao longo das últimas décadas tem ganho maior importância devido ao grande avanço tecnológico que se tem observado, levando ao aumento de aparelhos e serviços que utilizam energia elétrica. Por consequência, a proteção dos equipamentos principais das redes de distribuição elétrica torna-se muito importante. Devido à competição empresarial dos equipamentos que têm como principal função a proteção energética, é necessário criar equipamentos e estruturas que permitam satisfazer as novas exigências impostas por este tipo de mercado.

Este trabalho teve como base a solicitação da empresa Efacec, ligada ao fabrico de vários componentes essenciais para redes de distribuição elétrica, desde transformadores, disjuntores, entre outros, uma vez que teve origem no facto da empresa ligada ao ramo energético e necessitar de um novo método para incorporar novos equipamentos de corte de energia em subestações móveis. Esta solicitação focou-se no dimensionamento e otimização de uma estrutura para o suporte de um equipamento de proteção energética. O trabalho realizado teve de cumprir determinados requisitos relativamente à altura, largura, temperaturas e características dos materiais a serem utilizados, bem como algumas limitações impostas pela legislação. Neste sentido, o principal desafio deste trabalho foi projetar o mecanismo de ajuste de altura dos equipamentos. Foram apresentadas 3 soluções: um sistema hidráulico de atuadores; uma plataforma elevatória de maneira a regular a altura dos trans-rupters; e, por fim, a solução escolhida, que foi um sistema de acionamento mecânico constituído por uma caixa angular e um fuso acionado por uma manivela ou por algum tipo de equipamento elétrico apropriado para o efeito.

O dimensionamento pelo Método de Elementos Finitos (MEF) permitiu ter uma percepção do comportamento que a estrutura tem quando lhe forem impostas as forças resultantes da colocação do trans-rupter. Deste modo, a realização deste trabalho resultou uma estrutura com capacidade para cumprir os pressupostos impostos tanto em termos de funções pretendidas como requisitos de projeto. No entanto, existe sempre espaço para melhorias, de forma a otimizar a estrutura tornando-a mais acessível para implementação em vários locais e para utilização final.

KEYWORDS

Energy sector, energy protection, structural design, Finite Element Method, Transrupter.

ABSTRACT

The energy sector is becoming more and more important nowadays due to the great technological advance that has been observed, leading to an increase in appliances and services that increasingly use electric energy. Consequently, the protection of the main equipment of the electric distribution networks becomes very important. Due to the industrial competition of equipment that has as its main function the energy protection, it is necessary to create new equipment and structures that allow to satisfy the new requirements imposed by this type of market.

This work was based on the request by the company Efacec, linked to the manufacture of several essential components for electricity distribution networks, transformers, circuit breakers, among others, since it originated from the fact that the company linked to the energy sector needs a new method to incorporate new power cut-off equipment in mobile substations. This request is focused on the design and optimisation of a structure to support energy protection equipment. The work carried out had to meet certain requirements regarding height, width, temperatures and characteristics of the materials to be used, as well as some limitations imposed by legislation. In this sense, the main challenge of this work was to design the mechanism for adjusting the height of the equipment. Three solutions were presented: a system of hydraulic actuators; a lifting platform to regulate the height of the trans-rupters; and, finally, the chosen solution, which was a mechanical drive system consisting of a gear box and a spindle driven by a crank or some type of electrical equipment suitable for that purpose.

The design by the Finite Element Method (FEM) allowed to have a perception of the behaviour of the structure when the forces resulting from the placement of the trans-rupter are imposed on it. Thus, this work resulted in a structure with the capacity to meet the assumptions imposed both in terms of intended functions and design requirements. However, there is always room for improvement in order to optimise the structure, making it more accessible for implementation in various locations and for final use.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

FEM	<i>Finite Element Method</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
PKM	<i>Parallel Kinematic Machines</i>
S&C	<i>S&C Electric Company</i>

Lista de Unidades

€	Preço em euros
€/100	Preço em euros por cem unidades
g/cm ³	Massa volúmica
kg	Quilograma
kN	QuiloNewton
m	Metro
mm	Milímetro
mm ²	Milímetro ao quadrado
mm/s ²	Milímetro por segundo ao quadrado
MPa	Megapascal
N	Newton
N.mm	Newton milímetro

Lista de Símbolos

\emptyset	Diâmetro
A	Área total do liso do parafuso
A _s	Área útil da rosca
d ₀	Diâmetro do furo
d	Diâmetro nominal
e	Maior dimensão da cabeça do parafuso
e ₁	Distância à extremidade
e ₂	Distância ao bordo lateral
K	Altura da cabeça do parafuso
p ₁	Distância entre eixos
p ₂	Distância entre eixos
s	Entre-faces do parafuso

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Consumo de energia mundial em 2015 (PSU 2018)	9
Figura 2- Consumo de energia primária mundial entre 1971 e 2015 (PSU 2018)	10
Figura 3- Consumo de energia mundial desde 1990 e previsão até 2040 (PSU 2018)	10
Figura 4- Consumo de energia mundial per capita em 2004 (PSU 2018)	11
Figura 5- Formas de energia utilizadas com regularidade (Penedos 2006).....	11
Figura 6- Formas de energia utilizadas por empresas (Penedos 2006).....	13
Figura 7- Rede de distribuição de energia elétrica (Ribeiro 2019)	15
Figura 8- Tipos de núcleos de transformadores com os respectivos enroladores de bobinas (Guedes 1995)	16
Figura 9- Transformador de potência (GALOMS 2014)	17
Figura 10- Exemplo de radiador com ventoinhas (EFACEC)	17
Figura 11- Controlador de temperatura do transformador de potência (REINHAUSEN 2018)	18
Figura 12- <i>Tap changer</i> (REINHAUSEN 2018)	18
Figura 13- <i>On-load tap changer</i> (REINHAUSEN 2018)	19
Figura 14- Proteção diferencial de transformador (Medeiros 2014)	19
Figura 15- Fusíveis (Whelan et al. 2014).....	20
Figura 16- Disjuntores (Montenegro 2016)	20
Figura 17- Rele de pressão (QUALITROL 2018).....	21
Figura 18- Relé detetor de pressão (INDUBRAS)	21
Figura 19- Relé de Buchholz (REINHAUSEN 2018).....	21
Figura 20- 138-kV Trans-Rupter II <i>Transformer Protector pole-unit</i> (S&C 2004).....	22
Figura 21- Etapa 1: Interruptor fechado (S&C 2004)	23
Figura 22- Libertação do trinco de disparo (S&C 2004).....	23
Figura 23- Abertura do interruptor (S&C 2004)	23
Figura 24- Trans-rupter II montado (S&C 2018)	24
Figura 25- Fecho e carregamento do trans-rupter (S&C 2018)	24
Figura 26- Exemplo de estrutura em madeira (JULAR 2018).....	27

Figura 27- Exemplo de estrutura metálica (CMM)	28
Figura 28- Valores nominais dos aços macios mais correntes em termos de tensão de cedência, f_y , e tensão útil à tração, f_u (Simões 2014)	28
Figura 29- Geometrias de perfis laminados a quente (Simões 2014)	29
Figura 30-Soldadura com (a) e sem (b) material de adição (Santos e Quintino 1998)	29
Figura 31- Geometrias de chanfros (Santos e Quintino 1998)	33
Figura 32-Nomenclatura de junta soldada (Silva 2016)	33
Figura 33-Secções transversal e resistente do parafuso (Silva 2003).....	34
Figura 34-Tipos de solicitações numa ligação aparafusada (Silva 2003)	35
Figura 35-Exemplos de juntas adesivas (Dickerson 2001)	35
Figura 36-Distribuição de tensões numa superfície com furos (cima) e sem furos (baixo) (Silva et al. 2007)	36
Figura 37-Fusos com guias (AZETEK 2018)	37
Figura 38- guia linear (MACHININGNEWS 2015)	37
Figura 39- Motor elétrico trifásico (REIMAN 2018)	37
Figura 40- Principais elementos de um sistema pneumático (Santos e Silva 2014)	39
Figura 41- Exemplo de compressor volumétrico (FERRAMENTAS 2018)	40
Figura 42-Exemplo de válvula direcional pneumática (FESTO 2018)	41
Figura 43- Elemento finito triangular e respetivos nós (Alves 2017)	42
Figura 44- Exemplo de componente com malha (ACT 1995)	42
Figura 45-Análise de tensões num veio a) (LEARNEASY 2018) e análise de dispersão de ar no interior de um veículo (SIMULEON 2018)	43
Figura 46-Elementos de barra bidimensionais de 2 nós (Campilho 2012)	43
Figura 47-Elemento de barra (Bryan 2016)	43
Figura 48-Elemento de barra tridimensional de dois nós (CRANKSHAFT 2018).....	44
Figura 49-Elemento de viga bidimensional de 2 nós (Tawfik 2015)	44
Figura 50-Elemento de estrutura bidimensional de dois nós (Davis 2014)	45
Figura 51- Elemento de estrutura tridimensional de 2 nós (Campilho 2012)	45
Figura 52- Elemento bidimensional triangular de deformação constante (CRANKSHAFT 2018)	46
Figura 53-Elemento tetraédrico (Maciel 2013)	46
Figura 54-Elemento axisimétrico (NPTEL 2018)	46

Figura 55- Canino inferior e osso alveolar com a respetiva malha (Lotti et al. 2006)	47
Figura 56- Resultados de tensões induzidas por uma determinada solitação na estrutura (Costa 2014)	47
Figura 57- Resultados de deslocamentos por uma determinada solitação na estrutura (Costa 2014) ...	48
Figura 58- Análise MEF de um veio em tensões equivalentes de von Mises (a), tensão principal (b), deslocamento (c) e coeficiente de segurança (d) (Afolabi et al. 2018).....	48
Figura 59- <i>Parallel Kinematic Machine</i> (Tengfei e Jun 2018)	49
Figura 60- Análise de uma PKM em termos de deformações em x para um ângulo β de 0° (a), 45° (b), 90° (c), 135° (d) e 180° (e) (Tengfei e Jun 2018).....	49
Figura 61- Vista aérea da EFACEC polo da Arroiteia (Efacec 2019)	54
Figura 62- Trans-Rupter II® Transformer Protectors (S&C 2019)	55
Figura 63- Altura máxima do trans-rupter.....	55
Figura 64- Motor de carregamento	56
Figura 65- Estrutura em trânsito, sem rotação dos trans-rupters a) e com rotação dos trans-rupters b).	57
Figura 66- Localização dos atuadores pneumáticos	58
Figura 67- Chapas de acoplamento do trans-rupter	58
Figura 68- Estudo de inclinação do trans-rupter	59
Figura 69- Estrutura em modo de serviço (aberta)	60
Figura 70- Plataforma elevatória	60
Figura 71- Estrutura com plataforma elevatória	61
Figura 72- Localização do acionamento mecânico na estrutura	61
Figura 73- Sistema de acionamento mecânico.....	62
Figura 74- Solução final para a estrutura	65
Figura 75- Tabelas de propriedades físicas do bronze ao estanho CB3 (CONTIBRONZES 2018)	66
Figura 76- Módulo de análise pelo MEF do Autodesk Inventor	67
Figura 77- Condições iniciais da análise pelo MEF	67
Figura 78- Curva de convergência	68
Figura 79- Estrutura rotativa de suporte de trans-rupter	69
Figura 80- Braço da estrutura.....	69
Figura 81 - Chapa traseira do braço da estrutura.....	70
Figura 82- Furações para fixação da caixa guia	70

Figura 83- Furações traseiras dos perfis dos braços da estrutura	71
Figura 84- Nomenclaturas das distâncias entre eixos e às extremidades das furações	72
Figura 85- Distâncias dos furos às extremidades (a) e entre eixos das furações (b)	73
Figura 86- Distâncias dos furos às extremidades (a) e entre eixos das furações (b)	73
Figura 87- Fixação braço lateral	74
Figura 88- Distâncias dos furos às extremidades e entre eixos das furações	75
Figura 89- Chapa de fixação do braço para base de assentamento	75
Figura 90- Chapa de fixação dos braços laterais	76
Figura 91- Chapa de fixação	77
Figura 92- Peça para controlo de rotação	77
Figura 93- Braço lateral da estrutura.....	77
Figura 94- Chapas de acoplamento do trans-rupter	78
Figura 95- Chapas de acoplamento do trans-rupter	78
Figura 96- Braço lateral da estrutura.....	79
Figura 97- Braço central da estrutura.....	79
Figura 98- Forças e restrições aplicadas no braço lateral da estrutura	80
Figura 99- Zona de restrição <i>Fixed</i> do braço lateral da estrutura	81
Figura 100-Zonas de restrição do tipo pino do braço lateral da estrutura.....	81
Figura 101- Modelo com malha criada.....	82
Figura 102- Tensões máximas de von Mises	82
Figura 103-Localização da tensão máxima de von Mises	83
Figura 104 - Localização da fixação de posição das chapas por ligação aparafusada	83
Figura 105- Valor máximo e localização dos deslocamentos	84
Figura 106- Coeficiente de segurança mínimo	84
Figura 107-Localização do coeficiente de segurança mínimo	85
Figura 108- Rácio de convergência para a tensão de von Mises.....	85
Figura 109- Propriedades físicas do braço da estrutura.....	86
Figura 110- Braço lateral alterado.....	86
Figura 111- Braço otimizado com malha	87
Figura 112- Convergência para a simulação do braço da estrutura	87

Figura 113- Simulação MEF braço lateral	88
Figura 114- Localização da tensão máxima de von Mises	88
Figura 115- Deslocamentos presentes no braço lateral em trânsito	89
Figura 116- Coeficiente de segurança do braço	89
Figura 117- Localização do coeficiente de segurança mínimo	90
Figura 118- Propriedades físicas do braço lateral da estrutura.....	90
Figura 119- Base de assentamento da estrutura.....	92
Figura 120- Perfil UPN120 da base de assentamento	92
Figura 121- Travamento da base de assentamento	93
Figura 122- Sistema de rotação dos braços laterais	93
Figura 123- Distâncias das furações às extremidades e entre eixos	94
Figura 124- Cantoneiras da base de assentamento	94
Figura 125- Distâncias das furações às extremidades (a) e entre eixos (b).....	95
Figura 126- Chapa de assentamento do braço central.....	95
Figura 127- Pé da estrutura	96
Figura 128- Dimensões das furações às extremidades e entre eixos dos furos para a chapa superior	97
Figura 129- Dimensões das furações às extremidades e entre eixos dos furos para a chapa inferior	97
Figura 130- Suporte dos pés	98
Figura 131- Distâncias das furações às extremidades (a) e entre eixos (b).....	98
Figura 132-Base de assentamento	99
Figura 133- Localização das restrições <i>Fixed</i>	99
Figura 134-Tensões equivalentes de von Mises na base de assentamento	100
Figura 135- Localização da tensão máxima de von Mises	100
Figura 136-Deslocamentos máximos	101
Figura 137- Localização dos deslocamentos máximos	101
Figura 138- Análise do coeficiente de segurança mínimo	102
Figura 139- Localização ampliada do coeficiente de segurança mínimo	102
Figura 140- Momentos aplicados para a situação em trânsito	103
Figura 141-Tensões máximas de von Mises	103
Figura 142-Localização da tensão máxima de von Mises	104

Figura 143-Deslocamentos máximos em trânsito	104
Figura 144-Localização do deslocamento máximo	105
Figura 145-Valor mínimo e localização do coeficiente de segurança	105
Figura 146- Propriedades físicas da base de assentamento.....	106
Figura 147- Estrutura base de assentamento otimizada	106
Figura 148- Modelo da base de assentamento otimizada com malha criada	107
Figura 149-Tensão máxima de von Mises para a posição em serviço	107
Figura 150-Localização da tensão máxima de von Mises	108
Figura 151-Deslocamentos máximos em serviço	108
Figura 152- Localização ampliada do deslocamento máximo em serviço.....	109
Figura 153- Coeficiente de segurança mínimo para a posição em serviço	109
Figura 154- Localização ampliada do coeficiente de segurança mínimo em serviço	110
Figura 155- Aplicação dos momentos fletores para a posição de trânsito	110
Figura 156- Modelo da base de assentamento otimiza em trânsito com malha criada	111
Figura 157- Análise das tensões equivalentes de von Mises para a posição de trânsito	111
Figura 158- Localização ampliada da tensão máxima de von Mises	112
Figura 159- Análise do deslocamento máximo para a posição em trânsito.....	112
Figura 160- Localização ampliada do deslocamento máximo obtido para a posição em trânsito	113
Figura 161- Localização do coeficiente mínimo de segurança para a posição em trânsito	113
Figura 162- Propriedades físicas da base de assentamento otimizada	114
Figura 163- <i>Screw Jack</i>	115
Figura 164- Características do <i>Screw Jack</i>	115
Figura 165- Estudo curso do fuso	116
Figura 166- Etapa 1.....	116
Figura 167- Etapa 2.....	117
Figura 168- Porca sextavada M20	117
Figura 169- Pilares da base de assentamento	125
Figura 170- Travamentos dos pilares da base de assentamento	125
Figura 171- Base de assentamento da estrutura.....	126
Figura 172- Braço lateral da estrutura a) e braço central da estrutura b)	126

Figura 173- Subconjunto da caixa guia	127
Figura 174- Etapa 1: Montagem dos pilares da base de assentamento.....	136
Figura 175- Etapa 2: Montagem dos travamentos nos pilares da base de assentamento.....	136
Figura 176- Etapa 3: Montagem dos travamentos ao chão	137
Figura 177- Etapa 4: Montagem da base de assentamento	137
Figura 178- Etapa 5: Montagem dos sistemas de rotação dos braços laterais	138
Figura 179- Etapa 6: Montagem do braço central à chapa de fixação à base de assentamento	138
Figura 180- Etapa 7: Montagem do braço central e chapa de fixação à base de assentamento	139
Figura 181- Etapa 8: Montagem dos braços laterais nas chapas que fazem ligação aos sistemas de rotação	139
Figura 182- Etapa 9: Montagem dos braços laterais na base de assentamento	140
Figura 183- Montagem das chapas de acoplamento do trans-rupter nos braços	140
Figura 184- Etapa 10: Montagem das caixas guia nos braços da estrutura	141
Figura 185- Etapa 11: Montagem dos trans-rupter nas chapas de acoplamento	141
Figura 186- Zonas de inspeção de desgaste nos braços da estrutura e caixas guia: vista frontal a) e vista traseira b).....	142
Figura 187- Zona de desgaste no sistema de rotação dos braços laterais	143

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Formas de energia por região (Penedos 2006).....	12
Tabela 2- Formas de energia utilizadas em empresas, por região (Penedos 2006)	14
Tabela 3- Classificação de estruturas conforme a sua função (Connor e Faraji 2012).....	26
Tabela 4-Classificação das estruturas em função dos elementos constituintes (Connor e Faraji 2012)....	26
Tabela 5-Processos de soldadura conforme estados dos materiais de base e de adição (Silva 2016)	30
Tabela 6-Processos de soldadura segundo proteção da soldadura (Silva 2016).....	30
Tabela 7-Soldaduras consoante a fonte de calor (Silva 2016).....	31
Tabela 8-Aplicabilidade dos vários processos conforme o material de base (O'Brien 1991, Silva 2016)...	32
Tabela 9- Diâmetro da rosca passo e furo para rosca dos parafusos (Santos 2015)	34
Tabela 10-Propriedades das classes de parafusos (Silva 2003).....	34
Tabela 11- Vantagens e Desvantagens dos sistemas de automação (Santos e Silva 2014)	38
Tabela 12- Fatores que influenciam os sistemas pneumáticos (Santos e Silva 2014)	39
Tabela 13- Classificação de atuadores pneumáticos (Santos e Silva 2014).....	40
Tabela 14- Geometria dos parafusos (CEN 2011, Fonseca 2018).....	71
Tabela 15-Distâncias às extremidades e entre eixos das furações (CEN 2010).....	72
Tabela 16- Dimensões de chapa laminada a quente (CHAGAS)	74
Tabela 17- Tabela comparativa dos braços da estrutura para UPN120 e UPN80	91
Tabela 18- Tabela comparativa entre a 1ª análise e 2ª análise da base de assentamento.....	114
Tabela 19- Lista dos materiais e processos de fabrico dos componentes da estrutura	118
Tabela 20- Lista de componentes da estrutura	127
Tabela 21- Plano de manutenção da estrutura	143
Tabela 22- Níveis de severidade da análise FMEA	144
Tabela 23-Níveis de probabilidade de deteção da análise FMEA.....	145
Tabela 24- Níveis de probabilidade de falha da análise FMEA	146
Tabela 25- Análise FMEA	147
Tabela 26- Análise de custos dos componentes da estrutura	148

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Estrutura do relatório.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	O setor energético	9
2.1.1	Importância da indústria energética no contexto mundial	9
2.1.2	Importância da indústria energética no contexto nacional	11
2.1.3	Transporte de energia	14
2.1.4	Pilares da indústria energética	15
2.2	Transformadores de potência de energia elétrica.....	16
2.2.1	Contextualização e função dos transformadores	16
2.2.2	Requisitos dos transformadores e mecanismos acessórios	16
2.2.3	Mecanismos de proteção dos transformadores	19
2.2.4	Utilização do Trans-rupter.....	22
2.3	Projeto de estruturas metálicas.....	25
2.3.1	Requisitos de projeto de estruturas metálicas.....	25
2.3.2	Tipos de estruturas.....	26
2.3.3	Materiais comumente utilizados.....	27
2.3.4	Métodos de união entre componentes.....	29
2.3.5	Sistemas de movimentação e articulação	36
2.3.6	Sistemas de acionamento	37
2.3.6.1	Sistemas eletromecânicos	37
2.3.6.2	Sistemas pneumáticos	38

2.3.6.3	Sistemas hidráulicos	41
2.3.7	Método de Elementos Finitos no projeto mecânico	42
3	DESENVOLVIMENTO	53
3.1	Caracterização da empresa	53
3.2	Caracterização do equipamento a projetar	54
3.3	Requisitos do projeto	56
3.4	Anteprojeto	57
3.4.1	Soluções prévias	57
3.4.2	Tempestade de ideias.....	62
3.5	Projeto do equipamento	65
3.5.1	Solução final	65
3.5.2	Seleção de materiais	66
3.5.3	Métodos de dimensionamento utilizados.....	67
3.5.4	Projeto da estrutura	68
3.5.4.1	Braços da estrutura.....	68
3.5.4.2	Base de assentamento e pés da estrutura.....	91
3.5.5	Dimensionamento do sistema de acionamento	115
3.5.6	Processos de fabrico.....	117
3.5.7	Caracterização geral do equipamento	124
3.5.7.1	Desenho de conjunto.....	124
3.5.7.2	Subconjuntos	124
3.5.8	Lista de peças, componentes e dispositivos.....	127
3.5.9	Montagem do equipamento	135
3.5.10	Manual de manutenção.....	142
3.5.11	Análise FMEA	144
3.5.12	Análise de custos	147
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	161

5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	165
6	ANEXOS	173
6.1	Desenhos Técnicos.....	173
6.1.1	Planos de Fabrico	173
6.1.2	Planos de Montagem	174
6.2	Fichas Técnicas.....	175
6.2.1	Nook Industries Bevel Jack	175
6.2.2	FACOM MANIVELA 1/2"	176
6.2.3	FACOM S.H - CHAVES DE CAIXA 1/2" SEXTAVADAS MÉTRICAS S.31H	177

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Estrutura do relatório

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Atualmente, o setor energético depara-se com inúmeros desafios, como o crescimento contínuo da procura energética devido ao aparecimento de países de economia emergente, crise económica global, políticas acerca das alterações climáticas, a decadência da extração de petróleo, tensões geopolíticas, o declínio da energia nuclear e queda de custo das energias renováveis.

De maneira a enfrentar esses desafios é necessário que haja progresso e um desenvolvimento constante deste setor, desenvolvendo novos equipamentos de maneira a estarem em conformidade com os novos requisitos impostos.

Devido a uma grande dependência de energia da sociedade atual, é fundamental que exista um processo contínuo de produção e de fornecimento de energia. Assim sendo, devido a exigências de procura energética, os equipamentos necessitam de uma maior potência e melhor eficiência, tendo como consequência medidas de proteção eficazes para esse incremento.

Também em termos de transporte, localização e afins, as soluções para este setor têm de ser cada vez mais compactas e leves, devendo ser o mais otimizadas possível nestes aspetos. Isto leva a que exista uma interação entre setores de engenharia eletrotécnica e engenharia mecânica de maneira a que estes objetivos sejam cumpridos. Deste modo, um dos equipamentos resultantes deste progresso na indústria energética é o trans-rupter II da S&C, que tem como principal função efetuar o corte de energia quando existe um pico de tensão, o que garante uma maior segurança dos equipamentos elétricos e uma composição compacta, o que leva a que possa ser implementado em diversos tipos de localizações.

1.2 Objetivos

O presente trabalho teve origem no facto de uma empresa ligada ao ramo energético necessitar de um novo método para incorporar novos equipamentos de corte de energia em subestações móveis. Apesar da existência de vários mecanismos na empresa, nenhum conseguia satisfazer as condições impostas a nível de restrições legais impostas. Deste modo foram traçados os seguintes objetivos para a realização desta solução:

- Desenvolver uma estrutura capaz de suportar o trans-rupter e que permita, através de movimento, garantir distâncias de isolamento entre equipamentos;

- Desenvolver um mecanismo de rotação capaz de realizar uma rotação de maneira a diminuir a altura em transporte a que fica o trans-rupter;
- Ser de fácil utilização para o utilizador sem realização de grandes esforços ou manobras complexas;
- Otimizar a estrutura em termos de massa;
- Otimizar custos referentes a componentes da estrutura.

1.3 Estrutura do relatório

Na primeira parte deste trabalho, é realizada uma introdução de forma a apresentar qual a necessidade principal da realização do mesmo bem como das razões que levaram à sua realização, sendo elas o crescimento contínuo da procura energética face ao aparecimento de países de economia emergente, a crise económica global, as políticas acerca das alterações climáticas, a decadência da extração de petróleo, as tensões geopolíticas, o declínio da energia nuclear e a queda de custo das energias renováveis. Ainda nesta primeira parte são traçados os objetivos definidos para as soluções previstas.

Na segunda parte do trabalho são apresentados vários tópicos de maneira a enquadrar o leitor nos vários assuntos que influenciaram o trabalho. Entre esses tópicos estão a importância do setor energético tanto mundialmente como nacionalmente e como é realizado o transporte de energia. Também são abordados os tipos de estruturas, os principais materiais presentes em estruturas, os tipos de ligações que estão presentes na ligação dos vários componentes das estruturas e processos. Como no tema a desenvolver a estrutura apresenta partes móveis são ainda apresentados os possíveis sistemas de movimentação dos componentes móveis de uma estrutura e os respetivos sistemas de acionamento. Por último nesta parte ainda é apresentado o MEF, que foi o método de dimensionado abordado neste trabalho.

No último capítulo da tese trabalho é explanado o trabalho desenvolvido. Esta parte é constituída em primeiro lugar pela apresentação da empresa que disponibilizou o tema e ferramentas necessárias ao desenvolvimento deste trabalho. De seguida é realizada a caracterização da estrutura a dimensionar e é descrita a influência do trans-rupter no dimensionamento dessa estrutura e apresentados os vários requisitos de projeto que servem como ponto de partida para o anteprojeto da estrutura. Na parte de anteprojeto são apresentadas três possíveis soluções para a estrutura a dimensionar. Deste modo, é então escolhida uma, esta foi desenvolvida no trabalho.

Assim sendo, é realizado a enumeração dos vários componentes da estrutura, respetivo dimensionamento pelo MEF, discussão dos resultados obtidos e etapas de montagem da estrutura. De seguida são apresentados os vários processos de fabrico, materiais, fornecedores dos componentes da estrutura e custo total da estrutura. Ainda é realizada

uma análise FMEA de forma a analisar os riscos e de seguida feito o manual de manutenção da estrutura.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 O setor energético
- 2.2 Transformadores de potência de energia elétrica
- 2.3 Projeto de estruturas metálicas

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O setor energético

2.1.1 Importância da indústria energética no contexto mundial

A indústria energética consiste no conjunto de indústrias que produzem e vendem energia. Alguns exemplos são a extração de petróleo, manufaturação, refinamento e distribuição de petróleo. Atualmente a sociedade depende muito de energia, tornando este setor da indústria uma parte crucial para a sociedade mundial (VIVOEXPORT 2016).

Deste modo, a gestão dos recursos energéticos é muito importante para várias atividades cruciais à sociedade moderna como a agricultura, transporte, recolha de desperdícios, tecnologia e comunicações. Contudo, esta grande utilização de energia desde a Revolução Industrial também trouxe alguns problemas, como o aquecimento global, que se apresenta como uma grande ameaça (Patial 2018).

A energia primária mundial é consumida em quantidades imensas. Em 2015 (Figura 1), a China e os Estados Unidos representaram 40% do consumo global de energia (PSU 2018).

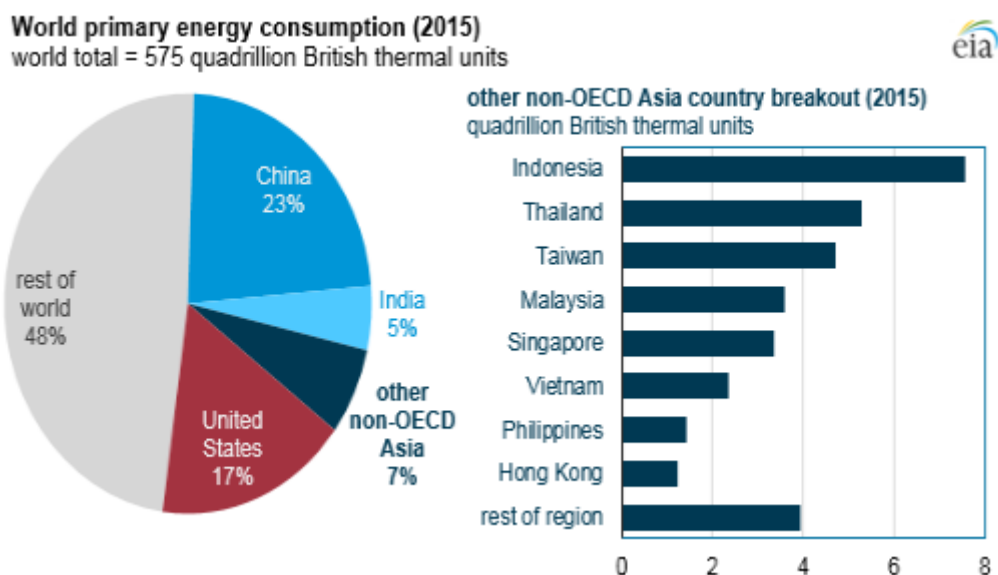


Figura 1- Consumo de energia mundial em 2015 (PSU 2018)

Numa análise de 1971 a 2005 (Figura 2) o consumo de energia duplicou, com domínio do petróleo, carvão e gás natural, tendo uma utilização entre 80 a 90% na criação de energia. A biomassa e energia hidroelétrica também começaram a ser recursos mais utilizados apesar de o crescimento ser menos acentuado que o do petróleo. Conforme se pode observar (Figura 2) as energias renováveis que são uma porção mínima no panorama de consumo de energia global em comparação com os outros recursos (PSU 2018).

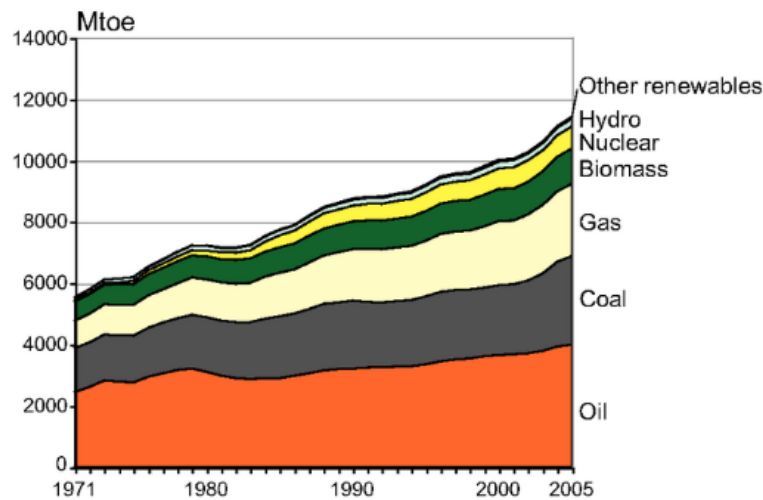


Figura 2- Consumo de energia primária mundial entre 1971 e 2015 (PSU 2018)

Projeções para 2040 (Figura 3) mostram que é esperado que o consumo de petróleo e combustíveis fósseis continue em crescimento com exceção do carvão. Também de notar que é esperado um aumento no uso das energias renováveis e também na energia nuclear (PSU 2018).

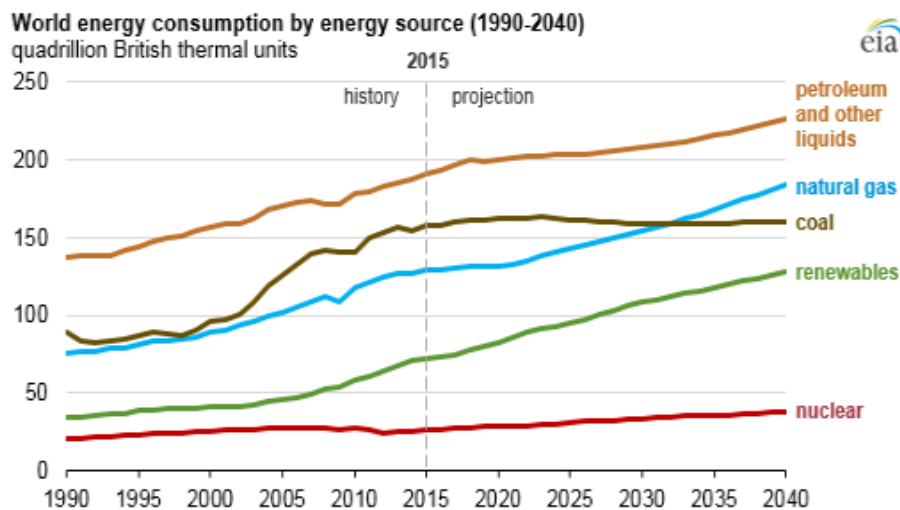


Figura 3- Consumo de energia mundial desde 1990 e previsão até 2040 (PSU 2018)

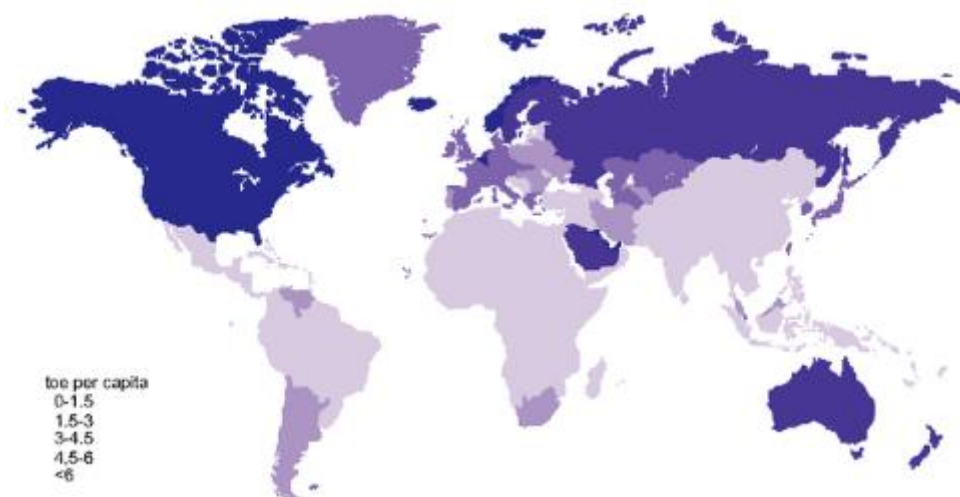


Figura 4- Consumo de energia mundial per capita em 2004 (PSU 2018)

2.1.2 Importância da indústria energética no contexto nacional

Em Portugal, num estudo com 2001 inquiridos (Figura 5), 99% dos consumidores utilizam energia elétrica e 79% recorrem à gasolina ou gasóleo. Por outro lado, 44% dos consumidores utilizam gás de garrafa e 41% gás natural. Para o resto das formas de energia como GPL e painéis solares, apenas 5% as utiliza regularmente (Penedos 2006).

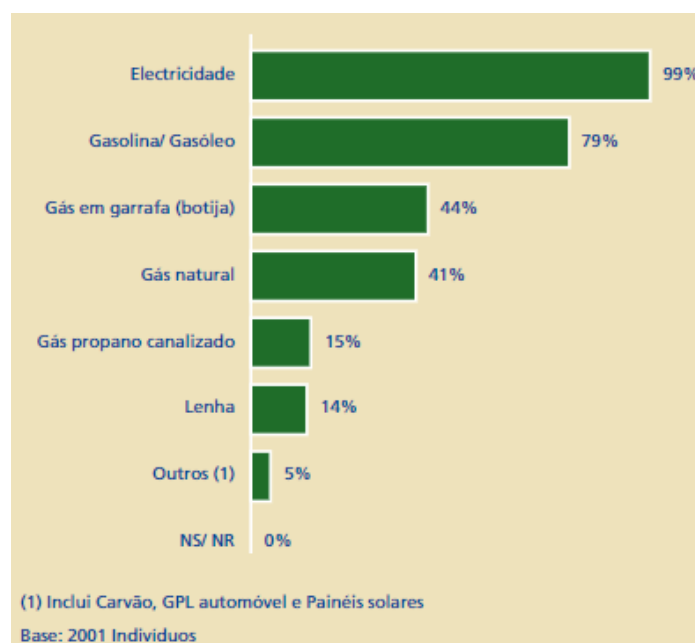


Figura 5- Formas de energia utilizadas com regularidade (Penedos 2006)

Após análise da utilização dos vários tipos de fontes de energia por região (Tabela 1), foram obtidos os seguintes resultados (Penedos 2006):

- **Gasolina/ gasóleo:** menor utilização na região da Madeira;

- **Gás em garrafa:** maior utilização no Litoral Norte, Algarve, Madeira e Açores;
- **Gás Natural:** menor utilização no Litoral Norte, Alentejo e Algarve; maior utilização no Litoral Centro e não utilização nas Regiões Autónomas;
- **Gás propano canalizado:** maior utilização no Alentejo e menor utilização no Porto e Açores;
- **Lenha:** maior utilização nas regiões Norte e Centro (Litoral e Interior) e menor utilização no Algarve e Madeira.

Tabela 1- Formas de energia por região (Penedos 2006)

Formas de energia utilizadas com regularidade por região						
	Electricidade	Gasolina/ Gasóleo	Gás em garrafa (botija)	Gás natural	Gás propano canalizado	Lenha
Total	99 %	79%	44 %	41%	15%	14%
Litoral Norte	100%	85%	73%	14%	15%	26%
Interior Norte	100%	84%	46%	46%	11%	39%
Grande Porto	100%	85%	40%	44%	4%	12%
Litoral Centro	100%	80%	21%	64%	18%	18%
Interior Centro	100%	84%	35%	53%	21%	28%
Grande Lisboa	99%	74%	36%	50%	17%	8%
Alentejo	100%	84%	56%	19%	24%	11%
Algarve	100%	86%	65%	16%	18%	4%
Madeira	100%	61%	82%	0%	19%	5%
Açores	98%	81%	93%	0%	8%	13%
Base: 2001 Individuos						

Em termos de clientes empresariais (Figura 6), todas as empresas inquiridas utilizam energia elétrica. Os derivados líquidos do petróleo, DLP, apresentam utilização de 95% em empresas industriais e 74% em empresas de comércio e serviços, 23% utilizam gás natural, 12% gás em garrafa e 6% usam GPL. Também a biomassa é utilizada neste setor atingindo valores de 11%. E o carvão e energia solar são pouco utilizadas por empresas de comércio e serviços (Penedos 2006).

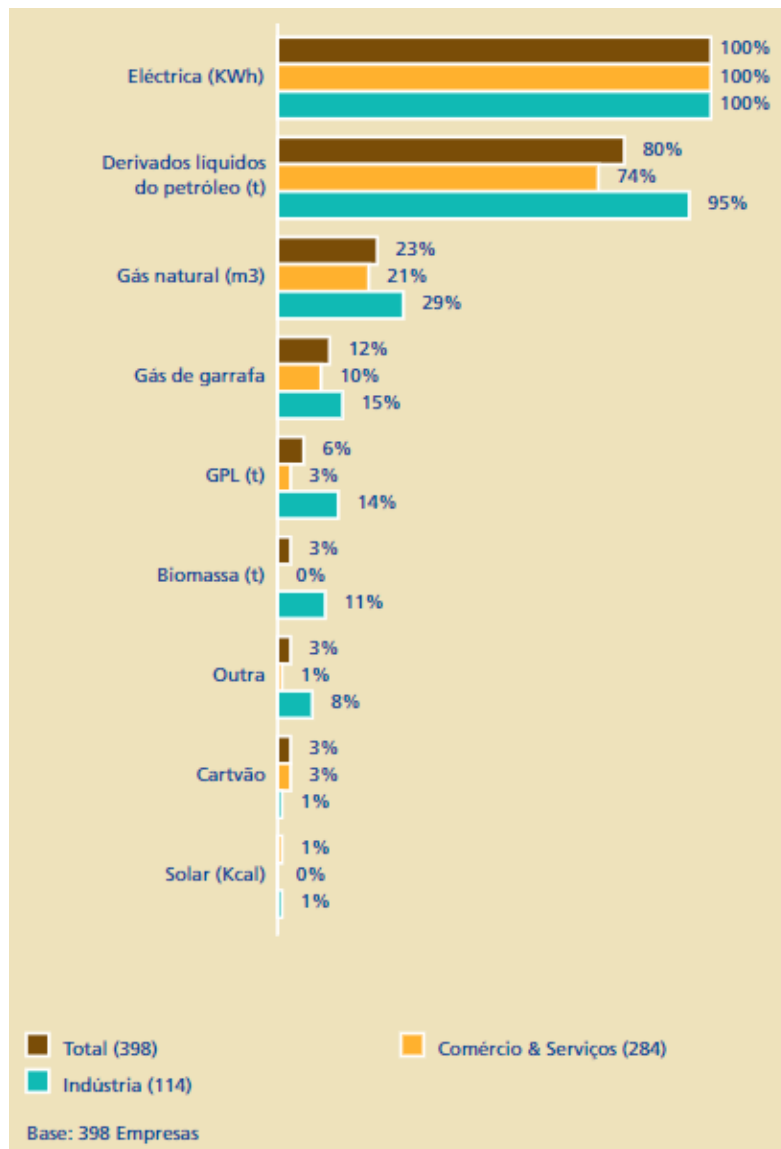


Figura 6- Formas de energia utilizadas por empresas (Penedos 2006)

Dividindo as empresas inquiridas por região (Tabela 2), foram obtidos os resultados sobre as formas de energia utilizadas (Penedos 2006):

- **DLP:** menor utilização na região de Lisboa e Vale do Tejo e maior nas regiões do Centro e Alentejo;
- **Gás natural:** menor utilização no Alentejo e Algarve e maior utilização no Vale do Tejo;
- **Gás de garrafa:** menor utilização no Centro e Vale do Tejo e maior utilização no Alentejo e Algarve;
- **GPL:** não utilização no Algarve e Alentejo.

Tabela 2- Formas de energia utilizadas em empresas, por região (Penedos 2006)

Formas de energia utilizadas por região						
	Total	Norte	Centro	Lisboa e Vale do Tejo	Alentejo	Algarve
Eléctrica	100%	100%	100%	99%	100%	100%
DLP	80%	88%	93%	65%	94%	71%
Gás natural	23%	21%	21%	31%	16%	5%
Gás de garrafa	12%	18%	6%	5%	22%	19%
GPL	6%	10%	7%	5%	3%	0%
Biomassa	3%	7%	3%	1%	0%	0%
Outra	3%	6%	3%	1%	3%	0%
Carvão	3%	2%	1%	4%	0%	0%
Solar	1%	0%	0%	1%	0%	5%
Base: 398 Empresas						

2.1.3 Transporte de energia

A energia elétrica, depois de ser produzida em centrais elétricas, é inserida na Rede Nacional de Transporte (Figura 7), que é constituída por linhas de Alta Tensão. Quando o transporte de energia é feito em grandes distâncias, é necessário manter o nível de tensão alto para minimizar as perdas de potência no transporte (Delado 2010, Silva 2017).

Em subestações, encontram-se transformadores que fazem a diminuição da tensão de maneira a que a energia elétrica possa circular em redes de distribuição de energia até chegar ao consumidor final. As redes de distribuição elétrica podem ser classificadas em redes de alta tensão, média tensão e baixa tensão (Silva 2017).

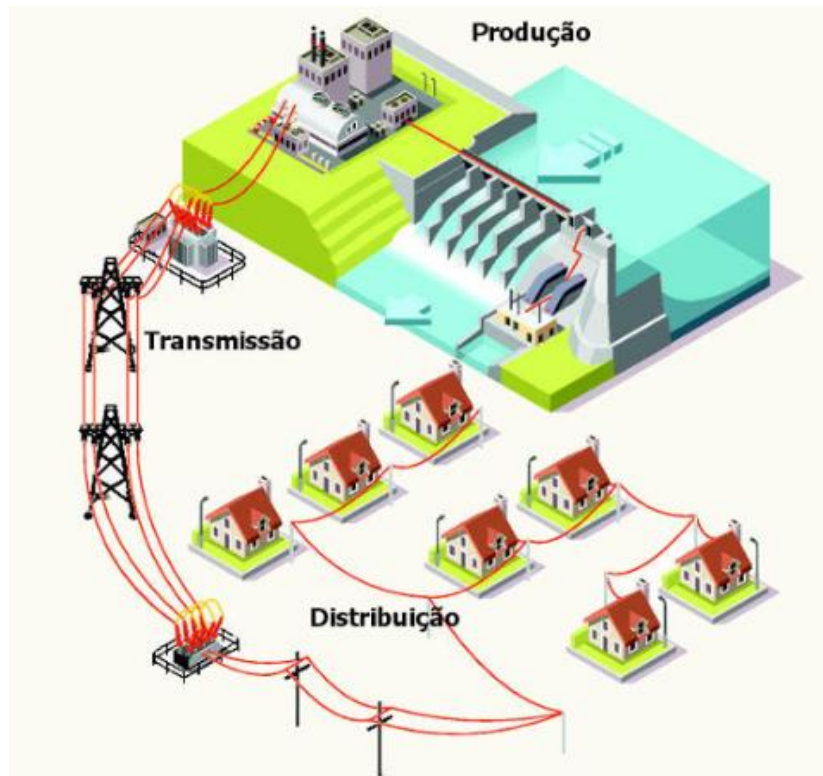


Figura 7-Rede de distribuição de energia elétrica (Ribeiro 2019)

2.1.4 Pilares da indústria energética

A indústria energética assenta em 3 pilares: o pilar técnico, o económico e o ambiental.

O pilar técnico consiste na melhoria da qualidade do serviço de maneira a reduzir a probabilidade de falhas por queda de alta tensão, o que provoca a diminuição da utilização percentual destas linhas (CIRCUTOR 2018).

O pilar económico consiste em reduzir os custos na transmissão e distribuição de energia, obtendo assim menos gastos em infraestruturas elétricas, tendo menos gastos em operação e manutenção. A redução dos custos de utilização de combustível também é um fator importante deste pilar devido à melhoria de eficiência de sistemas de cogeração que utilizam calor residual para aquecimento, refrigeração ou geração de eletricidade poupando na energia primária (CIRCUTOR 2018).

O pilar ambiental constitui a redução da emissão de agentes contaminantes para o meio ambiente. Deste modo, pretende-se potenciar o autoconsumo com sistemas de geração *in-situ* de forma a reduzir o consumo de energia primária de fontes comuns o que gera uma energia mais “limpa”. Contudo, apenas a utilização de fontes de energia mais limpas e descentralizar pontos de geração não basta, este pilar também tem como base a alteração da forma de consumir a energia, levando a que o utilizador final faça um consumo racional dos recursos energéticos (CIRCUTOR 2018).

2.2 Transformadores de potência de energia elétrica

2.2.1 Contextualização e função dos transformadores

Em várias situações, é preciso elevar ou baixar a tensão, ou converter a corrente elétrica de contínua para alternada ou o contrário, para esta estar adequada a determinadas utilizações, tendo como base de funcionamento a indução magnética (Alves 2003).

Um transformador é uma máquina eletromagnética estática com a função de transformar uma corrente alternada primária numa corrente secundária da mesma frequência mas normalmente com outra tensão e corrente diferente (Kostenko e Piotrovski 1979).

Deste modo, os transformadores de potência são constituídos, maioritariamente, por um enrolamento primário e um enrolamento secundário, ambos acoplados magneticamente, e um núcleo de chapa de aço igual ao da cuba do transformador (Kostenko e Piotrovski 1979, Bolotinha 2015).

O núcleo (Figura 8), de material ferromagnético, tem duas bobinas enroladas de maneira a que o fluxo magnético criado numa das bobinas envolva a outra bobina (Guedes 1995).

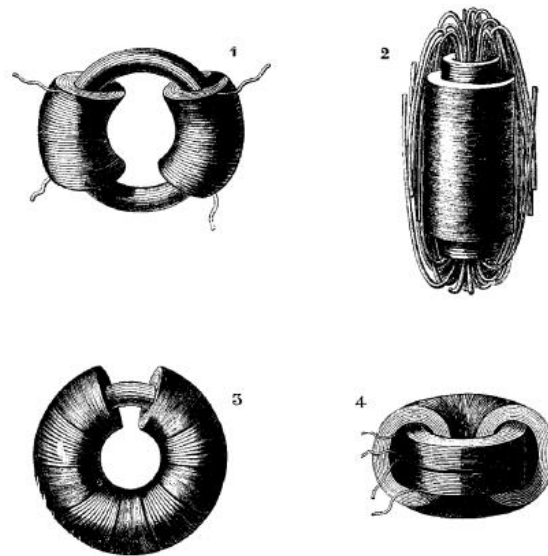


Figura 8- Tipos de núcleos de transformadores com os respetivos enroladores de bobinas (Guedes 1995)

2.2.2 Requisitos dos transformadores e mecanismos acessórios

Os transformadores de potência apresentam vários equipamentos auxiliares que têm como função garantir a manutenção e funcionamento deste. Um exemplo são os *bushings* (Figura 9), que permitem a ligação dos enrolamentos do transformador ao sistema elétrico, isto porque para transformadores no exterior os enrolamentos estão

cercados por uma cuba metálica (*tank*). Como estes se encontram energizados, necessitam de um isolador para isolar uns dos outros e da cuba (Winders Jr. 2002).

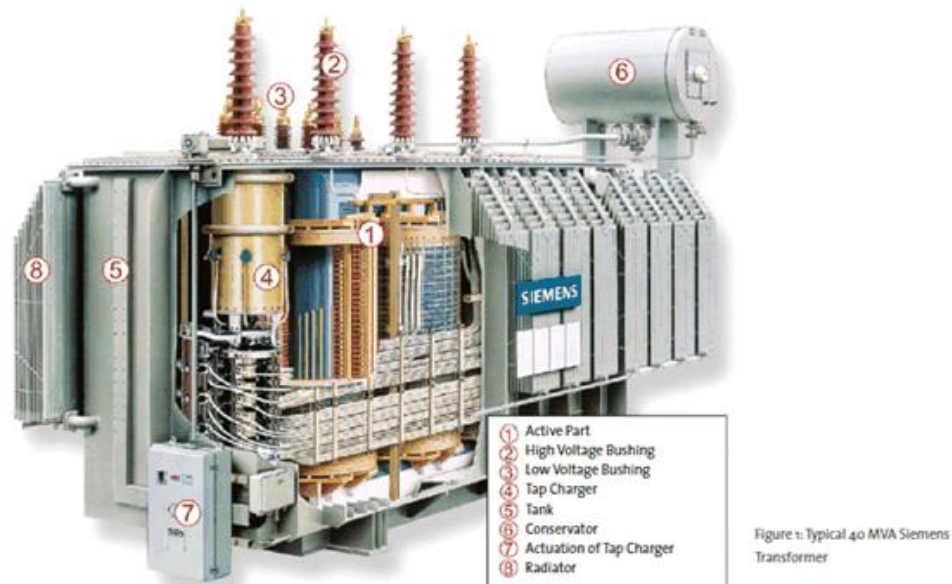


Figura 9- Transformador de potência (GALOMS 2014)

Outra situação a ter em conta é o arrefecimento do transformador. Para isto, é necessário que o calor proveniente de perdas do núcleo e dos cobses seja dissipado para a atmosfera. Desta forma, para o caso de transformadores secos, ou seja, sem isolamento de óleo, este arrefecimento é feito passando ar pelo núcleo, por convecção ou B ar forçado por ventoinhas (Winders Jr. 2002).

No caso de transformadores com arrefecimento a óleo, o arrefecimento é feito através de radiadores (Figura 10), que podem ter ou não uma ventoinha associada, e convecção natural (Winders Jr. 2002).



Figura 10- Exemplo de radiador com ventoinhas (EFACEC)

Para desligar e ligar os equipamentos de arrefecimento são utilizados controladores de temperatura (Figura 11), que medem a temperatura a que se encontra o óleo, sendo a temperatura recomendada de 25°C (Winders Jr. 2002).



Figura 11- Controlador de temperatura do transformador de potência (REINHAUSEN 2018)

A tensão nominal de um transformador pode não corresponder exatamente à tensão do sistema o que leva a que possa ser necessário aumentar ou diminuir a tensão de saída para fornecer uma certa carga. A mudança de tensão é afetada pela mudança do número de voltas do transformador fornecido com as *taps*. Para um controlo suficientemente próximo da tensão, as *taps* são normalmente fornecidas nos enrolamentos de alta tensão do transformador. O dispositivo responsável por este controlo é denominado de *tap changer* (Figura 12) e tem como característica a utilização somente em operações não energizadas (Winders Jr. 2002, Mandim 2013).



Figura 12- *Tap changer* (REINHAUSEN 2018)

Quando os níveis de carga ou tensões do sistema mudam com frequência é necessário ajustar a taxa de *tap* do transformador para acompanhar as mudanças no sistema. Como isto não pode ser feito quando o transformador não está energizado, foi desenvolvido um *on-load tap changer* (Figura 13) de maneira a alternar os *taps* em condições de carga completa (CIRCUITGLOBE , Winders Jr. 2002).



Figura 13- *On-load tap changer* (REINHAUSEN 2018)

2.2.3 Mecanismos de proteção dos transformadores

A proteção diferencial dos transformadores de potência (Figura 14) faz a verificação se a corrente de entrada é igual à corrente na saída, conforme a Lei de Kirchoff das correntes. A leitura é efetuada por transformadores de corrente no primário e secundário do transformador. Para contornar este problema são utilizados relés de proteção diferencial que atuam quando existe uma diferença entre as correntes de entrada e de saída (Mandim 2013, Medeiros 2014).

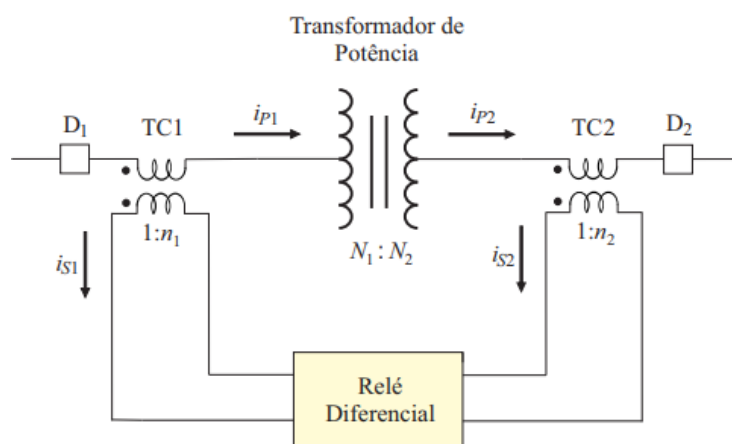


Figura 14- Proteção diferencial de transformador (Medeiros 2014)

Para proteger o transformador de sobre intensidades, são utilizados em primeiro lugar indicadores de curto-circuito de maneira a detetar as sobre intensidades (Medeiros 2014).

De seguida, a proteção pode ser feita por fusíveis (Figura 15), que cortam a corrente no circuito elétrico quando esta ultrapassa o limite do fusível. Estes podem ser acompanhados de um seccionador (INFOESCOLA 2006).



Figura 15- Fusíveis (Whelan et al. 2014)

A proteção também pode ser realizada através de um disjuntor (Figura 16). Estes possuem a mesma função que os fusíveis, cortando a corrente de um circuito elétrico quando esta ultrapassa o valor estipulado no disjuntor (INFOESCOLA 2006).



Figura 16- Disjuntores (Montenegro 2016)

São ainda utilizados relés de pressão (Figura 17) quando existe um aumento anormal do óleo dentro do transformador devido ao arco interno (Mandim 2013).



Figura 17- Relé de pressão (QUALITROL 2018)

No caso da existência de um tanque de expansão, para além da transmissão da onda de pressão do óleo, é também utilizado um relé detetor de pressão de gás (Figura 18) (Mandim 2013).



Figura 18- Relé detetor de pressão (INDUBRAS)

O relé de Buchholz (Figura 19) é a combinação do relé de pressão e o relé detetor de gás e protege os transformadores a óleo de defeitos internos. Este contém dois elementos, em que o primeiro consiste numa boia que deteta falhas por acumulação de gás, acionando um alarme. O segundo elemento consiste numa lâmina que deteta curto-circuitos, acionado um disjuntor (Mandim 2013).



Figura 19-Relé de Buchholz (REINHAUSEN 2018)

2.2.4 Utilização do Trans-rupter

Os trans-rupter são polos preenchidos por gás SF₆ selado provido de um sistema mecânico ativado eletricamente. Possui um interruptor *single-gap puffer-type* que interrompe o circuito em três ciclos e, quando aberto, mantém o *rating* dielétrico.

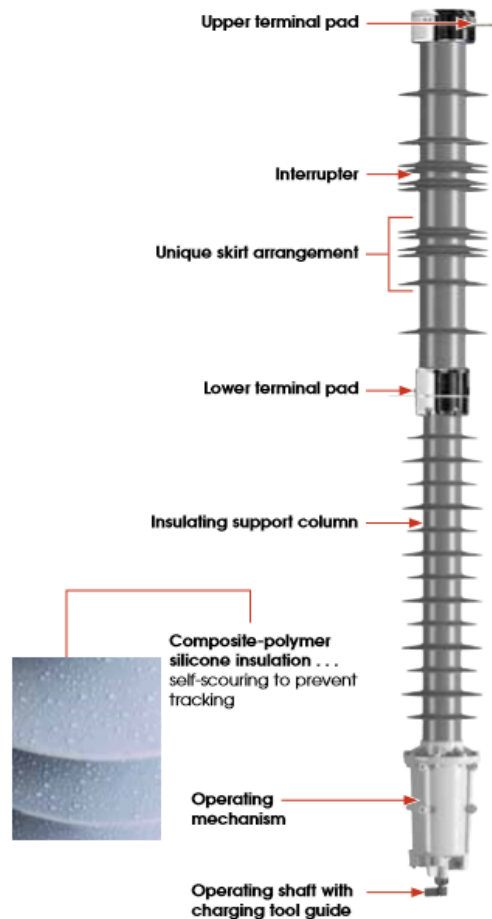


Figura 20- 138-kV Trans-Rupter II *Transformer Protector pole-unit* (S&C 2004)

O Trans-Rupter II inclui o disparo trifásico dos polos, eletricamente ligados. Este disparo está dividido em várias etapas (S&C 2004):

Etapa 1: Cada mecanismo de operação dos polos recebe um sinal de disparo do relé de proteção fornecido pelo utilizador.

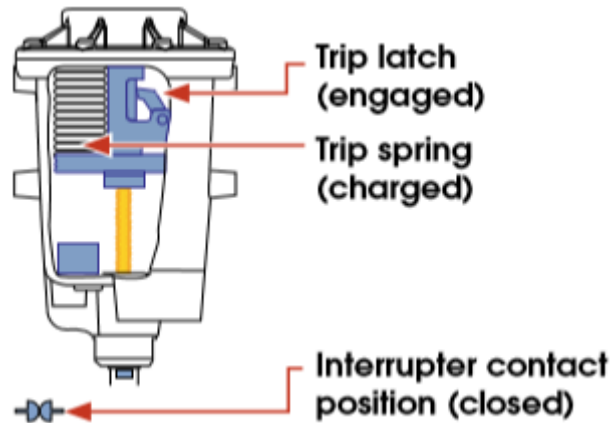


Figura 21- Etapa 1: Interruptor fechado (S&C 2004)

Etapa 2: O solenoide de disparo é energizado e a armadura do solenoide cai no trinco, o *latch*, de abertura, libertando o trinco.

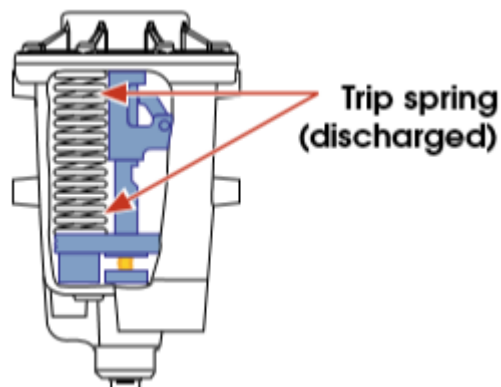


Figura 22- Liberação do trinco de disparo (S&C 2004)

Etapa 3: A energia armazenada das molas de disparo puxa a haste de operação para baixo, abrindo o interruptor.

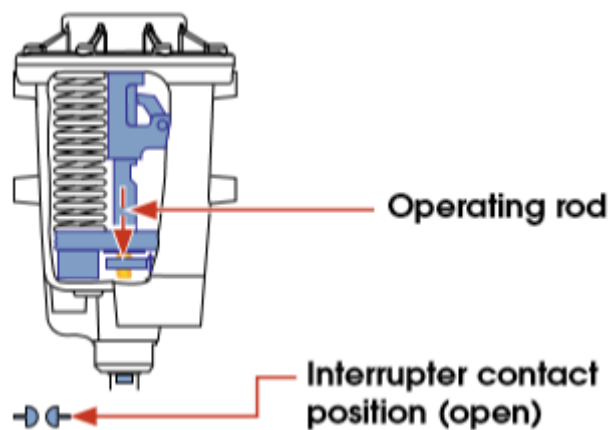


Figura 23- Abertura do interruptor (S&C 2004)

Etapa 4: Abrir a desconexão do lado da fonte para isolar o transformador.

Numa tentativa de reduzir custos, as concessionárias excluíram a proteção dos transformadores devido à necessidade de escolher entre um transformador mais caro com um sistema de elevada capacidade de proteção, como um *circuit-switcher* ou um disjuntor, ou reduzir no custo e ter uma proteção limitada, como fusíveis. Contudo o Trans-rupter II (Figura 24) da S&C abrange os dois fatores na aplicação em transformadores de subestações de distribuição.



Figura 24-Trans-rupter II montado (S&C 2018)

No modelo EX, os polos têm acionamento elétrico através de um relé programado pelo utilizador. Para fechar e carregar cada polo é utilizada uma ferramenta manual de fácil utilização (Figura 25). A ferramenta é engatada num eixo e girada em sentido anti-horário de maneira a fechar o interruptor, para reiniciar rodar no sentido horário, (S&C 2018).



Figura 25-Fecho e carregamento do trans-rupter (S&C 2018)

2.3 Projeto de estruturas metálicas

2.3.1 Requisitos de projeto de estruturas metálicas

Existem requisitos cruciais para que as estruturas estejam bem dimensionadas e exista um fabrico próprio das mesmas. Para tal, uma estrutura deve (Santiago 2017):

- Resistir a danos no caso de cargas inesperadas;
- Ter uma durabilidade que evite grandes gastos de manutenção;
- Resistir às ações resultantes da construção e instalação;
- Manter a funcionalidade durante a vida útil da estrutura.

Outro aspeto a ter em conta são as ações que influenciam a durabilidade e o tempo de vida útil. Perante estas ações as estruturas metálicas devem (CEN 2010):

- Ser projetadas com uma proteção à corrosão adequada, seja por proteção de superfície, usar aço inoxidável ou aços autoprotetidos;
- Garantir um tempo de vida útil adequado em relação à fadiga;
- Ser resistentes ao desgaste;
- Ser inspecionada;
- Ter manutenção.

Mais relativamente ao tempo de vida útil, este varia consoante a finalidade pretendida e o tempo que se deseja que a estrutura seja funcional.

Também a ter em conta são o estado limite de serviço e estado limite último, que ao serem ultrapassados tornam inviável o dimensionamento da estrutura. A excedência destes valores pode levar ao colapso parcial ou total da estrutura (Santiago 2017).

As estruturas metálicas devem também ser otimizadas economicamente sem pôr em causa a sua fiabilidade e de maneira a suportar todas as solicitações associadas à sua utilização (Santos 2015).

Em relação à fiabilidade, as estruturas metálicas devem ser construídas de forma a que preencham os requisitos necessários a garantir um bom nível de fiabilidade. Este nível é conseguido por um controlo de qualidade e execução das estruturas metálicas (Simões 2014).

Um dos aspetos a ter muito em conta são os materiais utilizados, cujas propriedades são obtidas com base nas normas do produto ou respetivas normas de ensaio. Por último, também as propriedades e grandezas geométricas devem seguir os valores característicos ou através de cálculo conforme as normas de produto ou normas de execução respetivos (CEN 2010, Simões 2014, Santos 2015).

2.3.2 Tipos de estruturas

As estruturas podem ser divididas conforme a sua finalidade. Assim sendo, podem ser classificadas em edifício, ponte, túnel, torre, muros de contenção, estrutura de contenção e plataforma (Tabela 3) (Connor e Faraji 2012).

Tabela 3- Classificação de estruturas conforme a sua função (Connor e Faraji 2012)

Tipo de estrutura	Função
Edifício	Providencia abrigo acima do nível do chão
Ponte	Providencia meio de transporte acima do nível do chão por cima de um local
Túnel	Providencia meio de transporte abaixo do nível do chão por um local
Torre	Apoiar linhas e dispositivos de transmissão
Paredes de contenção	Conter terra ou outros materiais
Contentores	Providenciar armazenamento de materiais ou guardar dispositivos perigosos como reatores nucleares
Plataformas	Providenciar plataforma de armazenamento de materiais ou maquinaria em situação <i>onshore</i> ou <i>offshore</i>

As estruturas metálicas também podem ser classificadas em função dos elementos constituintes da estrutura, definidos tendo em conta as cargas a que a estrutura está sujeita (Tabela 4) (Connor e Faraji 2012).

Tabela 4-Classificação das estruturas em função dos elementos constituintes (Connor e Faraji 2012)

Tipo de estrutura	Composição
Caixilho	Composto por elementos rigidamente ou semi-rigidamente ligados em padrões retangulares ou quadrangulares num plano ou em configuração 3D
Treliça	Tipo de estrutura em que os elementos estão conectados entre si nas pontas por pinos
Perfilado	Componentes retos conectados sequencialmente elementos de geometria de secção variada
Arco	Perfis curvos
Cabo	Composto por cabos ou vigas
Casca	Composto por elementos de superfície e possivelmente perfis estes podem ser planos ou curvos

2.3.3 Materiais comumente utilizados

A madeira permite criar estruturas (Figura 26) com inúmeras vantagens, como (Aghayere e Vigil 2007, Almeida 2012):

- Baixa densidade;
- Não existência de corrosão;
- Maior facilidade no manuseio do material;
- Madeira é um material renovável;
- Esteticamente aprazível.

Contudo, este material apresenta algumas desvantagens para a construção estrutural nomeadamente devido à sua inflamabilidade, a possibilidade de a madeira apodrecer e estar suscetível a fungos e à humidade, pode ocorrer uma variação dimensional e elevada variedade nas suas propriedades consoante a madeira (Aghayere e Vigil 2007, Almeida 2012).



Figura 26- Exemplo de estrutura em madeira (JULAR 2018)

As estruturas metálicas têm grande relevância atualmente pois possuem propriedades que tornam uma construção sustentável, devido ao grande potencial de reciclagem, e bastante versátil. Este tipo de estruturas tem um rápido processo de produção, devido ao facto de os seus componentes serem na sua maioria pré-fabricados (Diamantino 2014).

Outra vantagem pela relação entre a resistência e o peso do aço o que leva a uma minimização do peso próprio das estruturas e do custo associado ao transporte e montagem destas estruturas. O dimensionamento destas estruturas é maioritariamente condicionado por esta estabilidade e deformabilidade da estrutura e dos seus constituintes (Simões 2014).

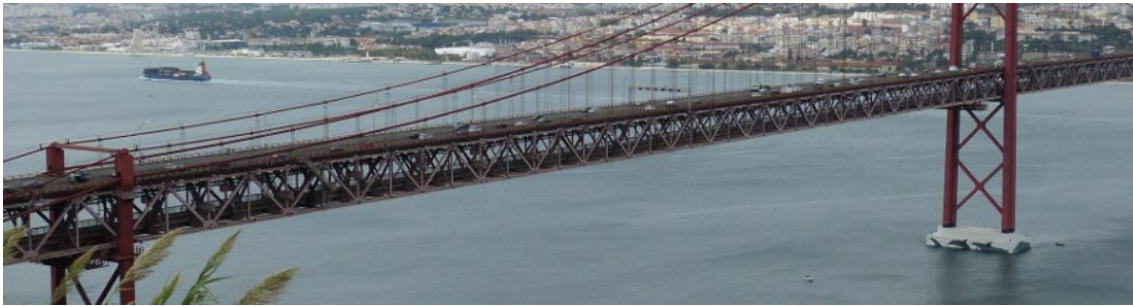


Figura 27- Exemplo de estrutura metálica (CMM)

Na construção metálica, os tipos de aços mais utilizados são os aços laminados a quente, ou aços macios, que apresentam baixas percentagens de carbono, podendo ir até cerca de 0.25%. Para tal, deve-se ter presente as propriedades mais importantes destes aços, como a tensão de cedência e tensão última (Figura 28) de maneira a proceder à sua correta implementação (Bjorhovde 2004).

Classes de resistência e de qualidade dos aços	Valor mínimo da tensão de cedência R_{eH} (MPa)				Tensão última R_m (MPa)		Valor mínimo em percentagem da extensão após rotura $L_0 = 5.65\sqrt{S_0}$		
	Espessura nominal (mm)				Espessura nominal (mm)		Espessura nominal (mm)		
	≤ 16	>16 ≤ 40	>40 ≤ 63	>63 ≤ 80	< 3	≥ 3 ≤ 100	≥ 3 ≤ 40	>40 ≤ 63	>63 ≤ 100
S 235 JR	235	225	215	215	360 a 510	360 a 510	26	25	24
S 235 J0	235	225	215	215	360 a 510	360 a 510			
S 235 J2	235	225	215	215	360 a 510	360 a 510	24	23	22
S 275 JR	275	265	255	245	430 a 580	410 a 560	23	22	21
S 275 J0	275	265	255	245	430 a 580	410 a 560			
S 275 J2	275	265	255	245	430 a 580	410 a 560	21	20	19
S 355 JR	355	345	335	325	510 a 680	470 a 630	22	21	20
S 355 J0	355	345	335	325	510 a 680	470 a 630			
S 355 J2	355	345	335	325	510 a 680	470 a 630			
S 355 K2	335	345	335	325	510 a 680	470 a 630	20	19	18
S 450 J0	450	430	410	390	-	550 a 720	17	17	17

Figura 28- Valores nominais dos aços macios mais correntes em termos de tensão de cedência, f_y , e tensão útil à tração, f_u (Simões 2014)

Em termos de geometria do material, nestas estruturas os elementos apresentam a forma de perfis lineares (Figura 29). Estes podem ser obtidos maioritariamente por laminagem a quente ou soldadura de placas (Simões 2014).



Figura 29- Geometrias de perfis laminados a quente (Simões 2014)

Outro material muito utilizado em estruturas é o betão armado, isto acontece porque apresenta várias vantagens como (Leonhardt e Monnig 1977):

- Ser facilmente maleável;
- Adapta-se a qualquer forma;
- Boa resistência ao fogo, influências atmosféricas e desgaste mecânico;
- Apresenta elevada resistência;
- É um material próprio para estruturas monolíticas, ou seja, sem juntas;
- É um material económico em relação à utilização de cimento.

No entanto, o betão armado também apresenta algumas desvantagens, como (Leonhardt e Monnig 1977):

- As construções em betão armado têm um peso elevado;
- Proteção térmica menor;
- As demolições e mudanças na construção são de elevado custo e trabalhosas.

2.3.4 Métodos de união entre componentes

Os diferentes componentes presentes nas estruturas podem ser unidos por diversos tipos de processos, sendo eles a soldadura, ligações aparafusadas e por ligações adesivas. As ligações soldadas (Figura 30) são ligações fixas em que ambos os materiais ficam ligados entre si intimamente (Silva 2016). Este processo pode trazer grande vantagem de utilização em termos de custos quando os componentes a unir são de espessuras reduzidas (Budynas 2008).

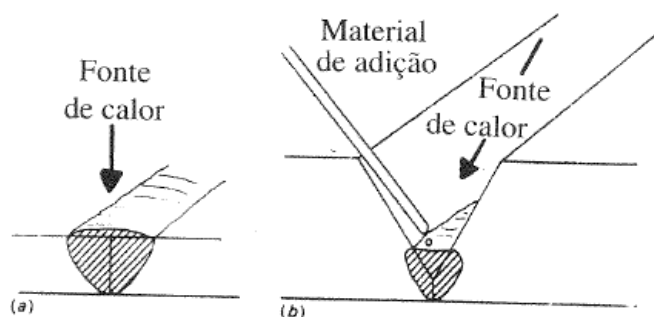


Figura 30-Soldadura com (a) e sem (b) material de adição (Santos e Quintino 1998)

Outras vantagens deste tipo de ligações são a possibilidade de aplicação num variado leque de materiais, geometrias e dimensões, garantia de continuidade metálica, inspeção realizada pode ser não-destrutiva e maior resistência, através de uma tensão de limite de elasticidade de rotura maior do que os materiais de base (Silva 2016).

Tendo em conta o estado dos materiais de base e adição, existem três tipos de processos de soldadura: soldadura por fusão, para os estados líquido/líquido, soldadura por brasagem, para os estados sólido/líquido, e soldadura por pressão, nos estados sólido/sólido (Tabela 5) (Silva 2016).

Tabela 5-Processos de soldadura conforme estados dos materiais de base e de adição (Silva 2016)

Líquido/Líquido	Sólido/Líquido	Sólido/Sólido
Fusão	Brasagem / Soldobrasagem	Pressão
Eléctrodo Revestido	Brasagem Fraca	Explosão
MIG – MAG	Brasagem Forte	Difusão
Fios Fluxados		Fricção
TIG		Ultrassons
Plasma		Pressão a Frio
Arco Submerso		Rolamento
Resistência		Indentação
Oxiacetilénica		Pressão com Chama
Eletroescória		Forjagem
Eletrogás		Estampagem
Laser		
Feixe de Eletrões		

Na soldadura por fusão, os processos de soldadura por arco são os que apresentam maior relevância. Neste tipo de processo, é utilizado calor para fundir o material para fazer a ligação dos materiais a serem soldados. Estes materiais solidificam após se retirar a fonte de calor (Santos e Quintino 1998).

Já no processo de soldadura no estado sólido é utilizado um contacto de pressão entre os dois lados da junta, a nível atómico, conseguido por deformação e/ou difusão atómica (Santos e Quintino 1998).

Contudo, dentro destes tipos, os processos de soldadura ainda podem ser divididos em termos do tipo de proteção da soldadura (Tabela 6) (Santos e Quintino 1998, Silva 2016).

Tabela 6-Processos de soldadura segundo proteção da soldadura (Silva 2016)

Proteção Gasosa	Proteção Sólida	Proteção Mista	Sem Proteção
Gás ou Mistura Gasosa	Escória	Gás + Escória	
MIG – MAG	Eléctrodo Revestido	Fio Fluxado	Resistência
TIG	Arco Submerso		Fricção
Plasma			Laser
			Feixe de Eletrões

No que toca às soldaduras, estas podem ser classificadas consoante o tipo de fonte utilizada na soldadura (Tabela 7) (Modenesi et al. 2012).

Tabela 7-Soldaduras consoante a fonte de calor (Silva 2016)

Eletricidade	Gás	Mecânica
Eléctrodo Revestido	Oxi - Acetilénica	Fricção
MIG – MAG	Brasagem Forte	Explosão
Fio Fluxado		Indentação
TIG		Ultrassons
Arco Submerso		
Plasma		
Resistência		
Laser		
Feixe de Electrões		
Brasagem Fraca		

De notar que nem todos os processos são adequados para todo o tipo de materiais. As espessuras dos materiais de base também influenciam se um processo de soldadura pode ou não ser aplicado (Tabela 8) (O'Brien 1991).

As soldaduras são influenciadas pela geometria da junta, pela espessura da junta, pelo processo de soldadura, acessibilidade da junta e tipo de material. Deste modo, existe a necessidade de preparar a junta para que haja uma melhor qualidade da mesma deforma a que exista uma boa penetração em toda a espessura da junta (O'Brien 1991, Santos e Quintino 1998).

Este chanfro consiste numa brecha nas peças que se pretende soldar. Existem vários tipos de chanfros com diferentes configurações, conforme as necessidades em termos de espessura, processo e soldadura (Figura 31) (Santos e Quintino 1998, Silva 2016).

Tabela 8- Aplicabilidade dos vários processos conforme o material de base (O'Brien 1991, Silva 2016)

MATERIAIS	Espessura (mm)	PROCESSOS DE SOLDADURA												
		ELÉTRODO REVESTIDO	MIG-MAG	FIO FLUXADO	TIG	PLASMA	ARCO SUBMERSO	RESISTÊNCIA	OXIACETILÉNICA	BRASAGEM	FRICÇÃO	LASER	FEIXE DE ELETRÔES	DFUSÃO
Aço ao Carbono	<3	S	S	-	S	-	S	S	S	S	S	S	S	-
	3-6	S	S	S	S	-	S	S	S	S	S	S	S	-
	6-19	S	S	S	-	-	S	S	S	S	S	S	S	-
	>19	S	S	S	-	-	S	-	S	-	S	-	S	-
Aço de Baixa Liga	<3	S	S	-	S	-	S	S	S	S	S	S	S	S
	3-6	S	S	S	S	-	S	S	-	S	S	S	S	S
	6-19	S	S	S	-	-	S	-	-	S	S	S	S	S
	>19	S	S	S	-	-	S	-	-	S	S	-	S	S
Aço Inoxidável	<3	S	S	-	S	-	S	S	S	S	S	S	S	S
	3-6	S	S	S	S	S	S	S	-	S	S	S	S	S
	6-19	S	S	S	-	S	S	-	-	S	S	S	S	S
	>19	S	S	S	-	S	S	-	-	-	S	-	S	S
Ferro Fundido	<3	-	-	-	-	-	-	-	-	S	S	-	-	-
	3-6	S	-	-	-	-	-	-	-	S	S	-	-	-
	6-19	S	S	S	-	-	S	-	S	-	-	-	-	-
	>19	S	S	S	-	-	S	-	-	-	-	-	-	-
Alumínio e suas ligas	<3	-	S	-	S	S	-	S	-	S	S	S	S	S
	3-6	-	S	-	S	-	-	S	-	S	S	S	S	S
	6-19	-	S	-	S	-	-	-	-	S	S	-	S	-
	>19	-	S	-	-	-	-	-	-	-	S	-	S	-
Cobre e suas ligas	<3	-	S	-	S	S	-	-	S	S	S	-	S	-
	3-6	-	S	-	-	S	-	-	-	S	S	-	S	-
	6-19	-	S	-	-	-	-	-	-	S	S	-	S	-
	>19	-	S	-	-	-	-	-	-	S	S	-	-	-
Níquel e suas ligas	<3	S	S	-	S	S	-	S	S	S	S	S	S	-
	3-6	S	S	-	S	S	S	S	-	S	S	S	S	-
	6-19	S	S	-	-	S	S	-	-	S	S	-	S	-
	>19	S	S	-	-	-	-	-	-	-	S	-	S	-
Titânio e suas ligas	<3	-	S	-	S	S	-	S	-	-	S	S	S	S
	3-6	-	S	-	S	S	-	-	-	-	S	S	S	S
	6-19	-	S	-	S	S	-	-	-	-	S	S	S	S
	>19	-	S	-	-	-	-	-	-	-	S	S	-	S

Designação	Esquema	Símbolo
Bordos direitos		
Em V		∨
Em X		X
Em Y		Y
Em U		U
Em meio V		∨
Em K		K
Em Y duplo		X
Em U duplo		U

Figura 31- Geometrias de chanfros (Santos e Quintino 1998)

Para além das juntas topo a topo, existem vários tipos de configurações de juntas conforme a finalidade de projeto pretendida (Figura 32), a função que irá ter ou os esforços impostos na junta (Silva 2016).

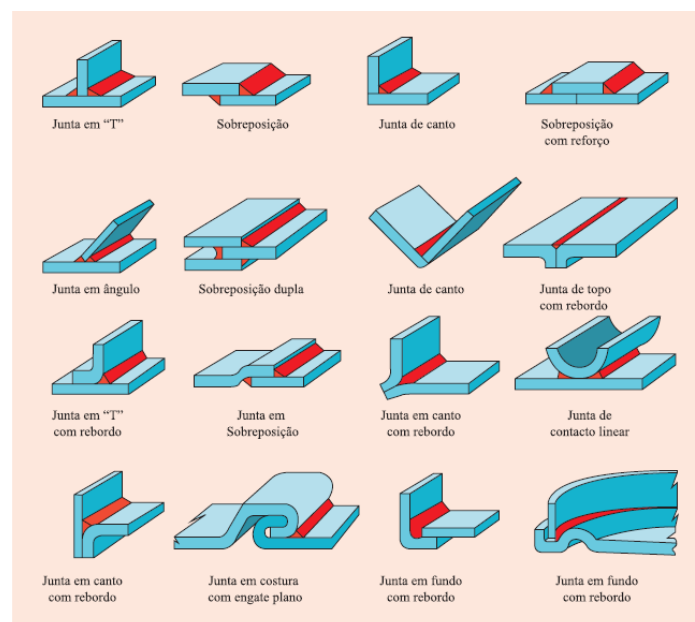


Figura 32-Nomenclatura de junta soldada (Silva 2016)

As ligações aparafusadas são o tipo de ligações mais vulgar na transmissão de esforços em estruturas por serem fáceis de fabricar, e de montagem e desmontagem rápida (Santos 2015).

Os parafusos apresentam várias combinações dimensionais relativamente ao comprimento e diâmetro. Exibem também características dimensionais específicas em relação ao passo e ao furo necessário para a abertura de rosca correspondente para cada tamanho de parafuso (Tabela 9). Existem também classes de parafusos (Tabela 10), correspondentes às propriedades do parafuso, nomeadamente à tensão de cedência (f_{yb}) e à tensão de rotura à tração (f_{ub}). (Silva 2003, Santos 2015).

Tabela 9- Diâmetro da rosca passo e furo para rosca dos parafusos (Santos 2015)

Tamanho	Passo (mm)	Furo (mm)
M2	0,4	1,6
M4	0,7	3,3
M5	0,8	4,2
M6	1	5
M8	1,25	6,75
M10	1,5	8,5
M12	1,75	10,2
M16	2	14
M20	2,5	17,5

Tabela 10-Propriedades das classes de parafusos (Silva 2003)

Classe do parafuso	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (MPa)	240	300	480	640	900
f_{ub} (MPa)	400	500	600	800	1000

Em termos das características dos parafusos, a zona que apresenta maior fragilidade é a parte roscada, A seção resistente do parafuso é o que dita a resistência do mesmo (Silva 2003).

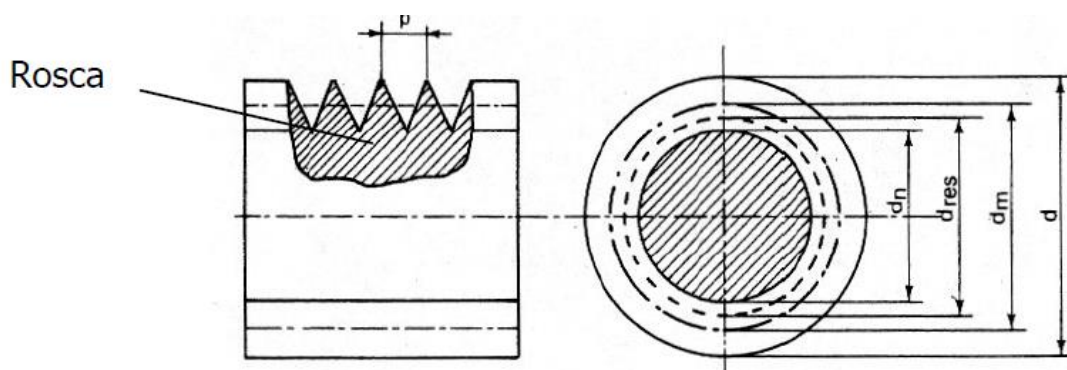


Figura 33- Secções transversal e resistente do parafuso (Silva 2003)

As ligações aparafusadas estão maioritariamente sujeitas a forças e momentos estáticos sendo estes principalmente: ao corte, esmagamento ou tração (Figura 34) (Silva 2003).

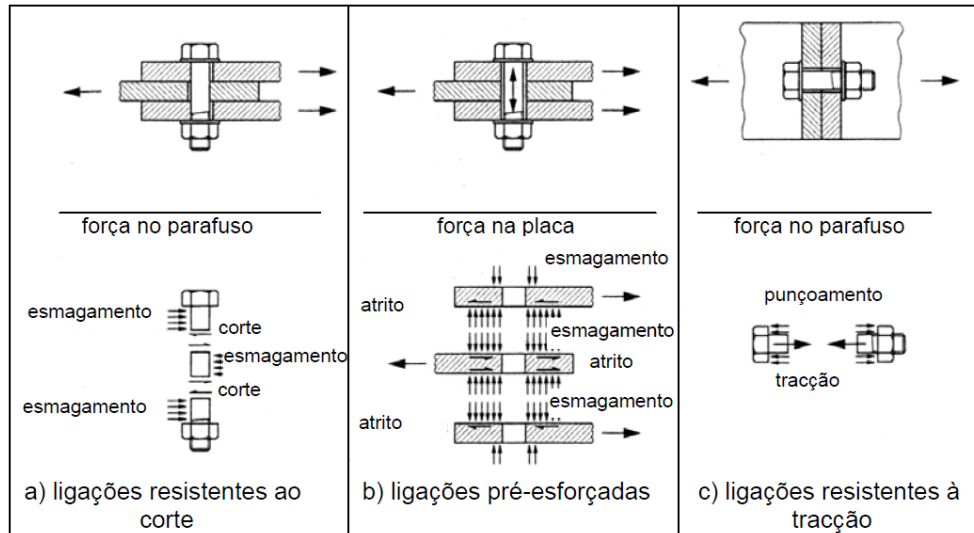


Figura 34-Tipos de solicitações numa ligação aparafusada (Silva 2003)

Para parafusos ao corte, caso a), a movimentação das placas na ligação é limitada pelo núcleo do parafuso. De ter em atenção, que neste tipo de ligação os modos de rotura são por esmagamento da placa, corte no parafuso e rotura de todo o bloco (Silva 2003).

Uma alternativa às ligações aparafusadas podem ser ligações adesivas denominadas de juntas adesivas (Figura 35). Deste modo, estes tipos de ligações são constituídos pelo material adesivo e respetivos substratos, antes da ligação, e aderentes, após a ligação. A adesão entre estes componentes permite a transferência de esforços dos aderentes para a junta adesiva (Pocius 2012).

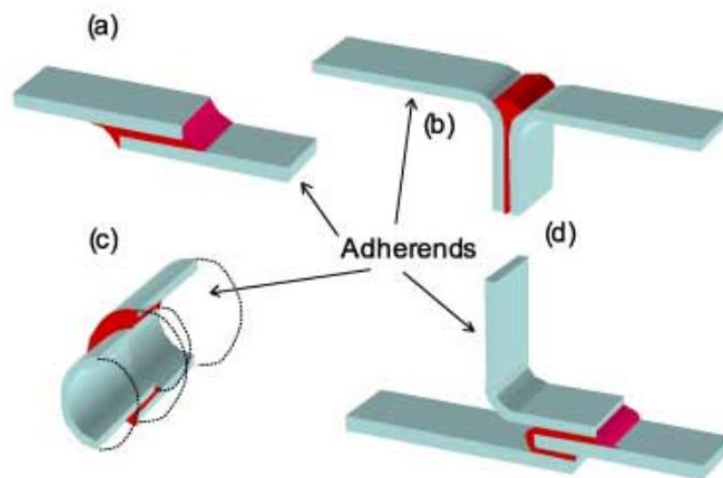


Figura 35-Exemplos de juntas adesivas (Dickerson 2001)

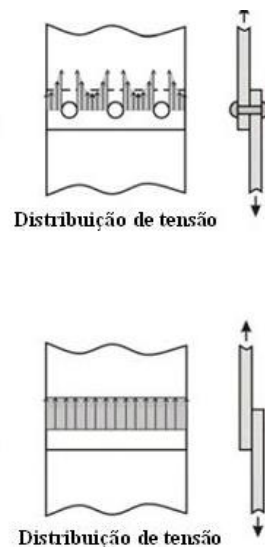


Figura 36-Distribuição de tensões numa superfície com furos (cima) e sem furos (baixo) (Silva et al. 2007)

As ligações adesivas apresentam variadas vantagens e desvantagens (Silva et al. 2007, Pocius 2012):

Vantagens:

- Boa flexibilidade da junta;
- Amortecimento de vibrações;
- Permite a ligação de materiais de coeficiente térmico distinto;
- Distribuição de tensões mais uniforme no componente (Figura 36);
- Boa resistência à fadiga;
- Contacto ininterrupto entre superfícies;
- Adiciona pouca massa à ligação.

Desvantagens:

- Necessitam de maior área de aplica que as ligações aparafusadas;
- Exige preparação das superfícies;
- Depende da aderência dos aderentes e adesivo para transmissão de esforços;
- Pouca resistência ao arrancamento e clivagem;
- Pouca resistência a tensões localizadas;
- Difícil inspeção da junta, o que pode levar a utilização de ensaios destrutivos;
- Muitas vezes necessita de uma pós-cura a temperaturas elevadas;
- Sensível a condições ambientais extremas.

2.3.5 Sistemas de movimentação e articulação

Para o acionamento mecânico, de maneira a gerar movimento e articulação, como forma de transmissão de energia entre elementos, costumam ser utilizados componentes como guias, fusos (Figura 37), polias, correias, rolamentos e engrenagens. A maior parte das máquinas atualmente apresenta este tipo de soluções de transmissão

de energia e criação de movimentos, dependendo da sua função e forma construtiva na sua seleção (Santos 2015).



Figura 37-Fusos com guias (AZETEK 2018)

Também podem ser utilizadas guias lineares (Figura 38) de maneira a fornecer um movimento com muito pouco atrito, posicionamento bastante preciso e fornecer uma grande capacidade de carga em movimentos suaves. Estas podem ser utilizadas em variadas máquinas como CNCs, tornos, máquinas de corte laser, máquinas para conformação, entre outros (KALATEC 2018).



Figura 38- guia linear (MACHININGNEWS 2015)

2.3.6 Sistemas de acionamento

2.3.6.1 *Sistemas eletromecânicos*

Os sistemas eletromecânicos constituem no uso de motores elétricos (Figura 39) devido ao custo reduzido em relação a outros tipos de motores, ao seu fácil transporte, construção simples, necessidade de pouca manutenção e fácil maneabilidade (Krause et al. 2012, Santos 2015).



Figura 39- Motor elétrico trifásico (REIMAN 2018)

A escolha dos motores depende essencialmente da utilização pretendida, binário aplicável, precisão, entre outros. Deste modo, os motores podem ser divididos em motores de corrente alternada (CA) e corrente contínua (CC) (Lyshevski 2000).

Estes motores costumam utilizar variadores de velocidade que, como o nome indica, variam a velocidade do motor elétrico para valores pretendidos. Os variadores de velocidade permitem poupar energia, ter melhor controlo da velocidade dos motores, e proporcionam melhor adaptação condições de trabalho e maior segurança (Santos 2015).

2.3.6.2 *Sistemas pneumáticos*

A utilização de ar comprimido permite combater vários problemas complexos de automatização. Apresenta um custo reduzido e uma grande facilidade de manuseamento (Fialho 2003, Santos e Silva 2014).

Na automação, o ar comprimido apresenta variadas propriedades (Tabela 11) que levam à preferência na sua utilização (Santos e Silva 2014).

Tabela 11- Vantagens e Desvantagens dos sistemas de automação (Santos e Silva 2014)

Propriedades do ar comprimido	
Custos	Baixos custos, pois o ar comprimido encontra-se em quantidades praticamente ilimitadas em todos os lugares.
Transporte	Facilidade de transporte através de tubagens, mesmo para distâncias consideráveis.
Armazenamento	Fácil armazenamento no local de utilização em reservatórios de pressão móveis ou fixos. Facilidade de transporte.
Variações de temperatura	Pouca variação das propriedades face às oscilações de temperatura.
Segurança	Não existe perigo de explosão ou incêndio. Elementos “carregáveis” até à sua paragem total, proteção contra sobrecargas.
Limpeza	Limpo e isento de poluentes atmosféricos. O ar, que eventualmente escapa das tubagens ou outros elementos inadequadamente vedados, não polui o ambiente. Esta limpeza é uma das exigências, por exemplo, na indústria alimentar, têxtil e química.
Economia	Elementos de trabalho de construção simples e económica. Ausência de proteções custosas contra explosões ou risco de incêndio.
Velocidade	O ar comprimido é um meio de trabalho rápido, permitindo alcançar elevadas velocidades de funcionamento oscilando entre 1 e 2 m/s.
Regulação	Velocidades e forças de trabalho dos elementos facilmente reguláveis sem escala.

Existem fatores que influenciam o desempenho do sistema pneumático (Tabela 12), ou seja, se este tem ou não um bom funcionamento (Santos e Silva 2014).

Tabela 12- Fatores que influenciam os sistemas pneumáticos (Santos e Silva 2014)

Fatores que influenciam os sistemas pneumáticos	
Preparação	O ar comprimido requer a eliminação de impurezas e de humidade, pois estas provocam desgaste nos elementos pneumáticos.
Fiabilidade	Impossibilidade de manter uniforme e constante a velocidade dos cilindros mediante ar comprimido.
Forças	O ar comprimido é económico somente até uma determinada força, pois esta é limitada pela pressão normal de trabalho bem como pelo curso e velocidade. O valor limite da força é entre os 20000 e 30000 N.
Escape do ar	O ar comprimido é ruidoso. Com o desenvolvimento de silenciadores este problema pode ser minimizado.
Custos	O ar comprimido é uma fonte de energia cara. Porém, o alto custo da energia produzida está em grande parte compensado pelos preços vantajosos dos elementos e pela elevada rentabilidade do ciclo de trabalho.

Um sistema pneumático, é composto por uma série de elementos que têm relevância na entrada e saída, controlo e processamento dos sinais. Os elementos deste tipo de sistemas são normalmente uma fonte de energia, elementos de entrada de sinal, processamento, controlo e atuação (Figura 40) (Parr 1998).

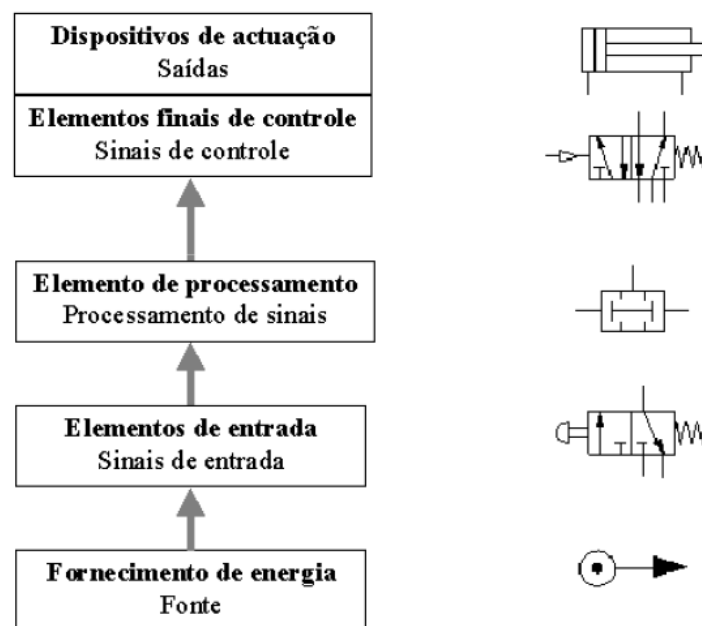


Figura 40- Principais elementos de um sistema pneumático (Santos e Silva 2014)

Na produção de ar comprimido são utilizados compressores. Estes absorvem mecanicamente o ar atmosférico, por ação de uma força externa, comprimindo-o até à pressão de trabalho desejada. Esta compressão pode levar até uma pressão de 8 bar. Assim sendo, podem-se classificar os compressores (Figura 41) conforme a forma como é feita compressão, podendo ser dinâmica ou volumétrica (Fialho 2003).



Figura 41- Exemplo de compressor volumétrico (FERRAMENTAS 2018)

A energia que o ar possui é transformada em movimento retilíneo por ação de cilindros pneumáticos e em movimentos de rotação por ação de motores. Existem vários tipos de atuadores pneumáticos (Tabela 13), podendo ser classificados conforme o modo de funcionamento ou classe (Santos e Silva 2014).

Tabela 13- Classificação de atuadores pneumáticos (Santos e Silva 2014)

Classificação dos cilindros pneumáticos	
Tipo	Classe
Simples Efeito	Leve
Duplo Efeito	Média
	Pesada
	Mini
	Membrana
	Tandem
	Dupla Haste
	Rotação

Os elementos emissores de sinais e comando, denominados de válvulas (Figura 42), têm a função de comandar a grandeza da variável pneumática (válvulas reguladoras) e alterar o *layout* do circuito, (válvulas direcionais). Deste modo, as válvulas dividem-se em 5 grupos sendo eles as válvulas direcionais, de bloqueio, de fluxo, de pressão e de fecho (Solé 2007, Santos e Silva 2014).



Figura 42-Exemplo de válvula direcional pneumática (FESTO 2018)

2.3.6.3 Sistemas hidráulicos

A hidráulica é uma das formas de transmissão de energia através do transporte de um fluido sob pressão. Um sistema hidráulico transforma a energia mecânica em energia hidráulica através de bombas que, de seguida, é transmitida pelo fluido hidráulico e controlada por dispositivos de comando e regulação. Por fim, é transformada outra vez em energia mecânica em motores ou cilindros hidráulicos (Solé 2007, Silva e Santos 2016).

Algumas vantagens destes sistemas são (Fialho 2006, Silva e Santos 2016):

- Obtenção de forças, binários e potências elevados com componentes de dimensões reduzidas;
- Fácil controlo de movimentos retilíneos com força constante;
- Movimentos suaves que reduzem o desgaste dos componentes;
- Velocidades lineares e variáveis sem necessitar de estar dependente da carga;
- Flexibilidade em mudar o layout do sistema;
- Boa durabilidade e fiabilidade;
- Autolubrificantes.

Contudo, também existem algumas limitações associadas a este tipo de sistemas (Fialho 2006, Silva e Santos 2016):

- Perdas de carga nas tubagens e nos acessórios;
- Sensível a variações de temperatura, viscosidade e compressibilidade do fluido e elasticidade das tubagens;
- Fugas externas podem provocar libertação de vapores de óleo que poluem o ambiente e tem risco de incêndio;
- Alta qualidade mecânica dos órgãos hidráulicos que levam a custos elevados.

2.3.7 Método de Elementos Finitos no projeto mecânico

De uma maneira geral, o MEF consiste em dividir um domínio da uma estrutura em vários elementos. Deste modo é então analisado o comportamento de cada elemento dentro desse elemento, ou subdomínio (Campilho 2012).

Estes elementos, denominados de elementos finitos, interligam-se com outros elementos através de nós (Figura 43), criando uma malha (Figura 44). No caso mais comum os nós correspondem aos vértices do elemento em causa (Chandrupatla 1997).

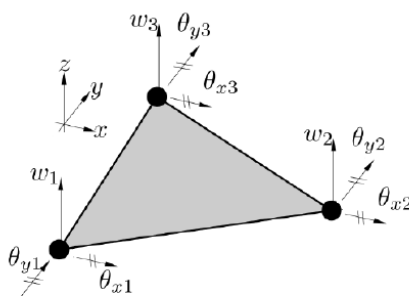


Figura 43- Elemento finito triangular e respetivos nós (Alves 2017)

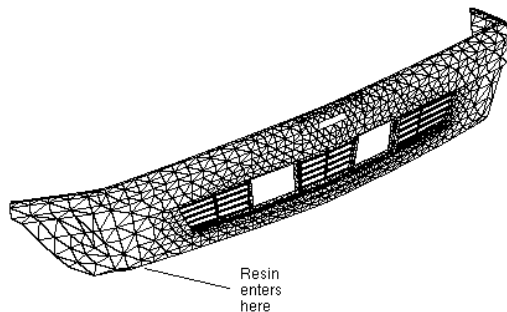


Figura 44- Exemplo de componente com malha (ACT 1995)

Na ligação entre os elementos, as zonas a analisar é interpolada na totalidade da estrutura por um número de expressões polinomiais igual ao número de elementos existentes (Cook 1995).

Na escolha da malha é necessário ter em atenção ao refinamento da mesma pois este deve ser selecionado tendo em atenção o tipo de estrutura, alterações abruptas de geometria como furos ou entalhes e em função a precisão dos resultados da análise (Campilho 2012).

Deste modo, para se ter uma maior aproximação da solução exata, é necessário um aumento do refinamento da malha, o que leva ao aumento do número de elementos na malha (Cook 1995, Campilho 2012).

Existem várias vertentes de aplicação do MEF (Figura 45), como análise de tensões de componentes, análises térmicas, análises sísmicas, *crash tests*, análise de dispersão de contaminantes e análise eletromagnética (Campilho 2012).

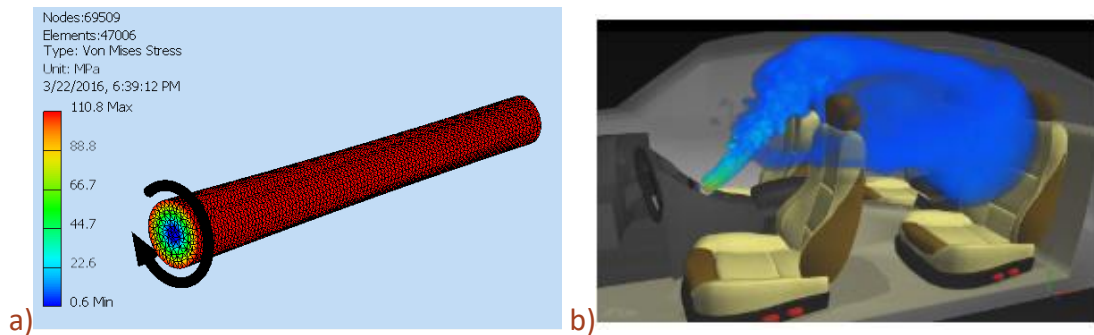


Figura 45-Análise de tensões num veio a) (LEARNEASY 2018) e análise de dispersão de ar no interior de um veículo (SIMULEON 2018)

No que toca aos elementos de barra, estes são maioritariamente utilizados para modelar estruturas de barras reticuladas. Deste modo, os elementos encontram-se à tração ou à compressão pura não transmitindo momentos fletores. É necessário portanto que as cargas e as reações estejam aplicadas nas extremidades das barras (Figura 46) (Chandrupatla 1997, Campilho 2012).

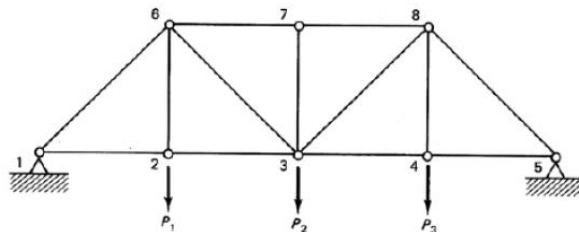


Figura 46-Elementos de barra bidimensionais de 2 nós (Campilho 2012)

Este método permite obter diretamente os deslocamentos nodais pela solução do sistema global (Figura 48) (Reddy 1993, Campilho 2012).

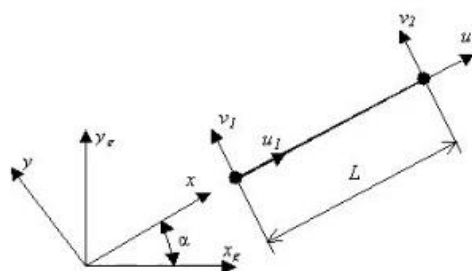


Figura 47-Elemento de barra (Bryan 2016)

Para as estruturas reticuladas articuladas modeladas com elementos de barra tridimensionais de dois nós (Figura 48), é preciso que haja uma transformação de k_e para o sistema de coordenadas globais igual a todos os elementos da estrutura de maneira a que se possa obter a matriz K (Rao 2010).

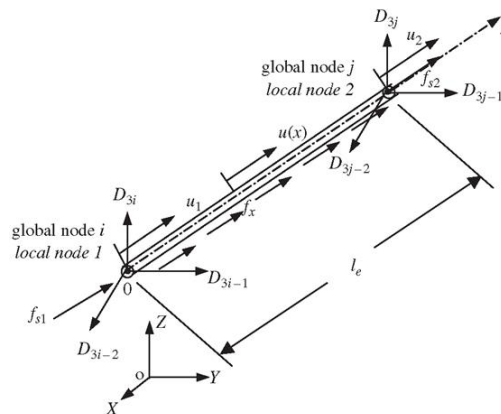


Figura 48-Elemento de barra tridimensional de dois nós (CRANKSHAFT 2018)

Comparativamente aos elementos de barra, os elementos de viga (Figura 49) permitem a existência de momentos fletores, por causa das ligações entre os elementos serem rígidas, e estarem sujeitos a esforços transversos (Logan 2007, Campilho 2012).

Deste modo, não existe deslocamento ao longo do elemento, não existindo cargas axiais (Bhatti 2005, Campilho 2012).

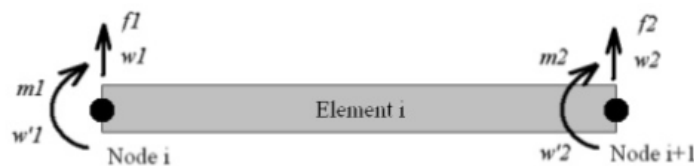


Figura 49-Elemento de viga bidimensional de 2 nós (Tawfik 2015)

Para a análise de estruturas reticuladas de elementos orientados em direções diferentes no plano é utilizado o elemento de estrutura bidimensional de 2 nós. Este elemento possui deslocamento transversal, axial e rotação (Figura 50) (Chandrupatla 1997, Ferreira 2009).

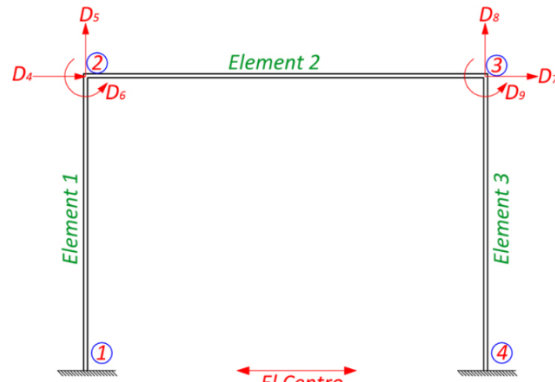


Figura 50-Elemento de estrutura bidimensional de dois nós (Davis 2014)

O elemento de estrutura tridimensional de 2 nós (Figura 51) permite a existência de esforços axiais, torção, corte em duas direções e flexão em dois planos ortogonais. São aplicados em estruturas tridimensionais de elementos com ligações rígidas (Chandrupatla 1997, Campilho 2012).

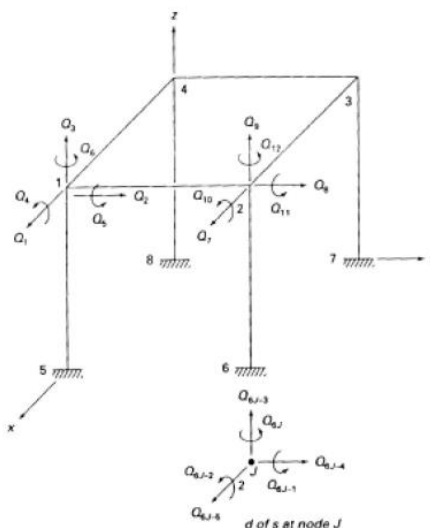


Figura 51- Elemento de estrutura tridimensional de 2 nós (Campilho 2012)

O elemento bidimensional triangular de deformação constante (Figura 52) apresenta 3 nós nos vértices levando a que haja 6 variáveis nodais. Todas as formas bidimensionais podem ser discretizadas através deste elemento de forma expedita, mesmo que os elementos não sejam iguais em forma e tamanho. Devido ao facto de as deformações, e conseqüentemente as tensões, serem constantes dentro do elemento, existe uma simplificação do estado de tensões em zonas de mudança abrupta de tensões (Campilho 2012).

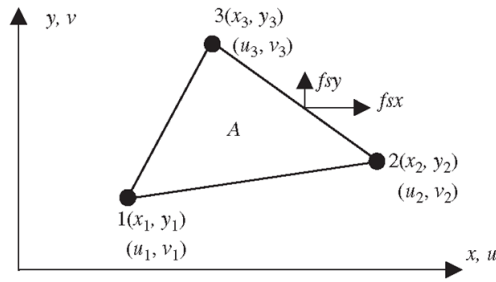


Figura 52- Elemento bidimensional triangular de deformação constante (CRANKSHAFT 2018)

O elemento tridimensional tetraédrico de deformação constante (Figura 53) é o elemento mais simples deste tipo e resulta numa grande imprecisão em termos de resultados no caso de variações significativas em termos de deformações e tensões (Campilho 2012).

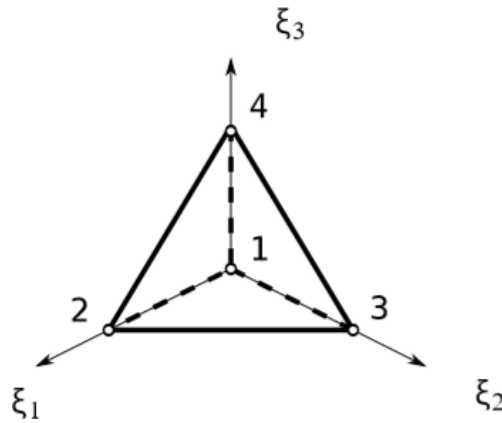


Figura 53-Elemento tetraédrico (Maciel 2013)

Os elementos axisimétricos (Figura 54) (Campilho 2012) podem ser considerados elementos bidimensionais descritos em coordenadas cilíndricas, e são utilizados em estruturas em que haja simetria geométrica e de carregamento relativas ao eixo de revolução do corpo.

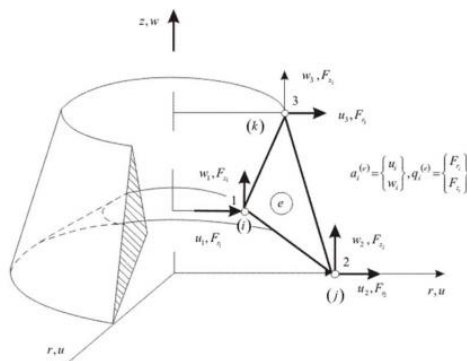


Figura 54-Elemento axisimétrico (NPTEL 2018)

Em termos práticos o MEF, como referenciado anteriormente, pode ser utilizado em vários campos. Um deles é a Ortodontia, para correção de posição de dentes (Lotti et al. 2006).

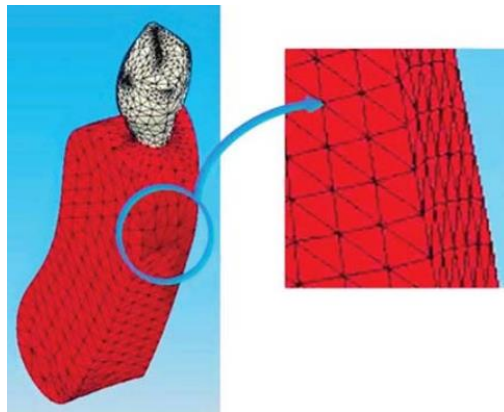


Figura 55- Canino inferior e osso alveolar com a respectiva malha (Lotti et al. 2006)

Assim sendo, é possível analisar os deslocamentos, distribuição de tensões durante movimentos dos dentes, esforços ortopédicos no crânio, cargas em implantes e resistência dos braquetes em qualquer material ou estrutura dento-maxilo-facial (Lotti et al. 2006).

Em termos de análise de estruturas metálicas, também é possível fazer a determinação de tensões máximas na estrutura (Figura 56) e deslocamentos máximos dos elementos através do elemento de viga (Figura 57), após aplicação de um momento torsor e uma carga à flexão (Costa 2014).

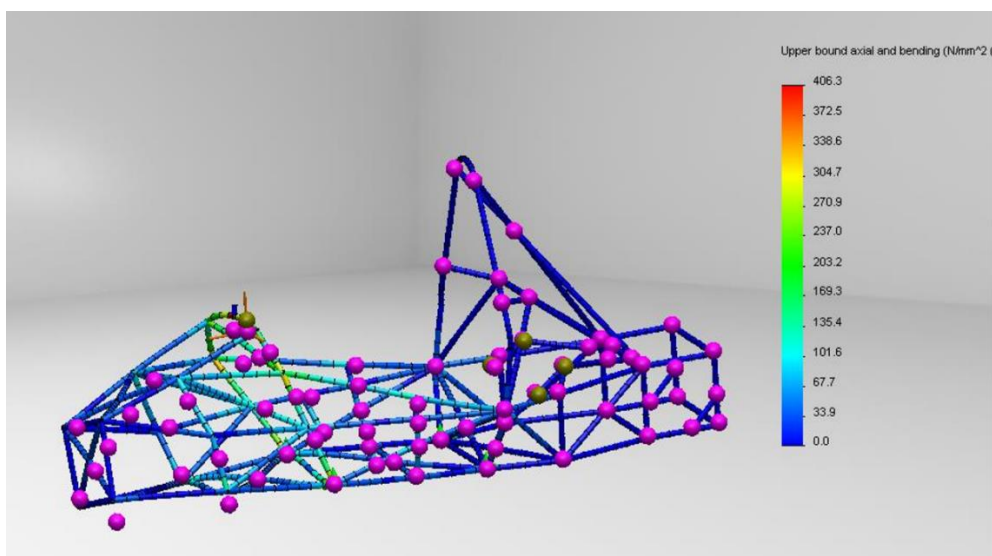


Figura 56- Resultados de tensões induzidas por uma determinada solicitação na estrutura (Costa 2014)

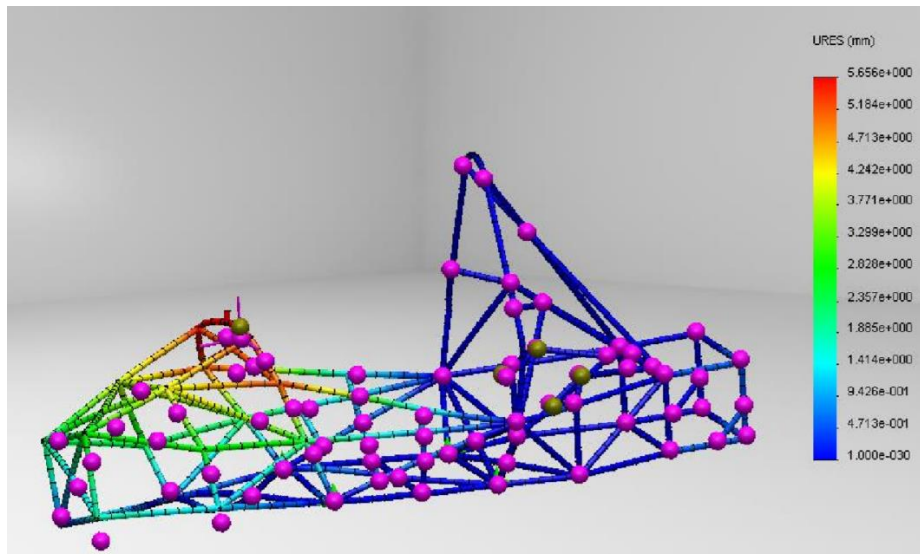


Figura 57- Resultados de deslocamentos por uma determinada solicitação na estrutura (Costa 2014)

Num exemplo de análise de um veio pelo MEF, após ter sido aplicado um binário e forças de impulso no veio, é também possível verificar o comportamento do mesmo em termos de tensões equivalentes de von Mises, tensão principal, deslocamentos e coeficiente de segurança (Figura 58) (Afolabi et al. 2018).

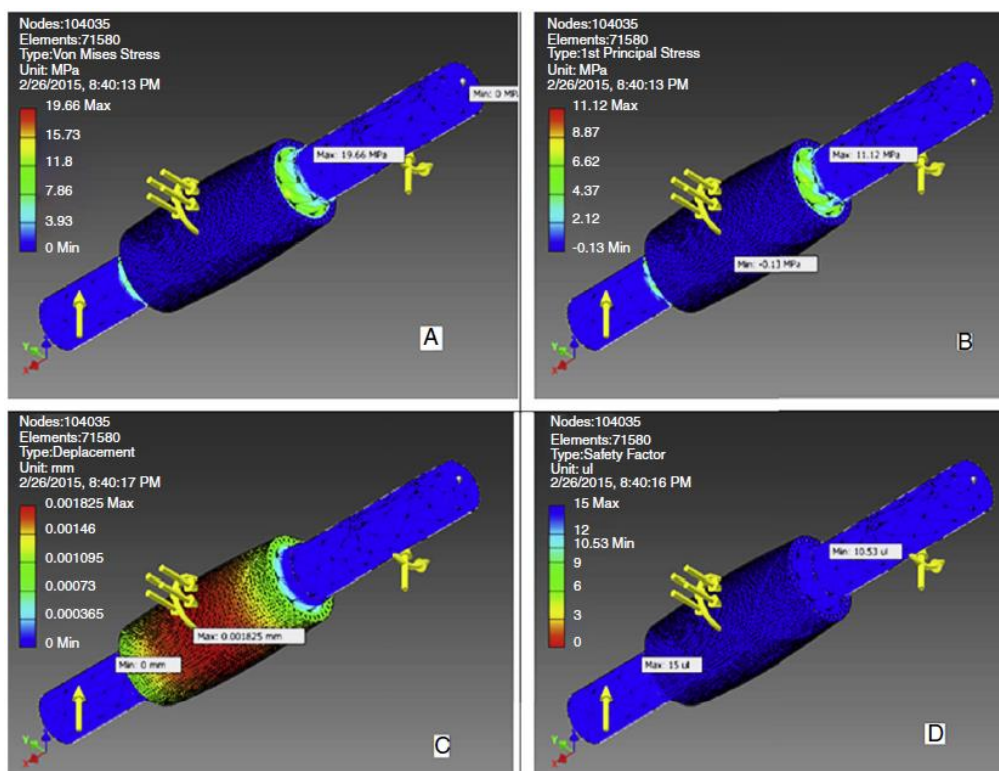


Figura 58- Análise MEF de um veio em tensões equivalentes de von Mises (a), tensão principal (b), deslocamento (c) e coeficiente de segurança (d) (Afolabi et al. 2018)

Na análise do comportamento mecânico de uma PKM (Figura 59), utilizadas na robótica da indústria aeronáutica, com a variação do ângulo β (Figura 59), ângulo de configuração da máquina em relação a Y, para 0° , 45° , 90° , 135° e 180° , da PKM obtém-se os resultados relativos às deformações na direção x após aplicação da aceleração gravítica (Figura 60). Esta análise tem como finalidade comparar os resultados obtidos para a plataforma móvel e base fixa da PKM (Tengfei e Jun 2018).

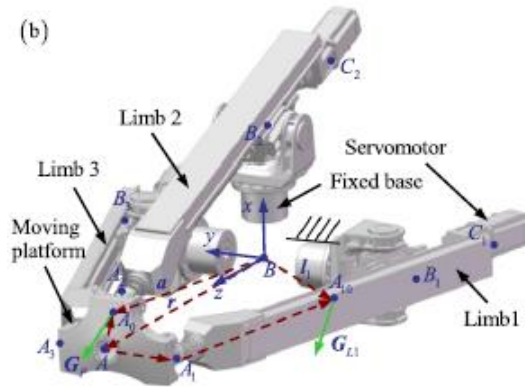


Figura 59- Parallel Kinematic Machine (Tengfei e Jun 2018)

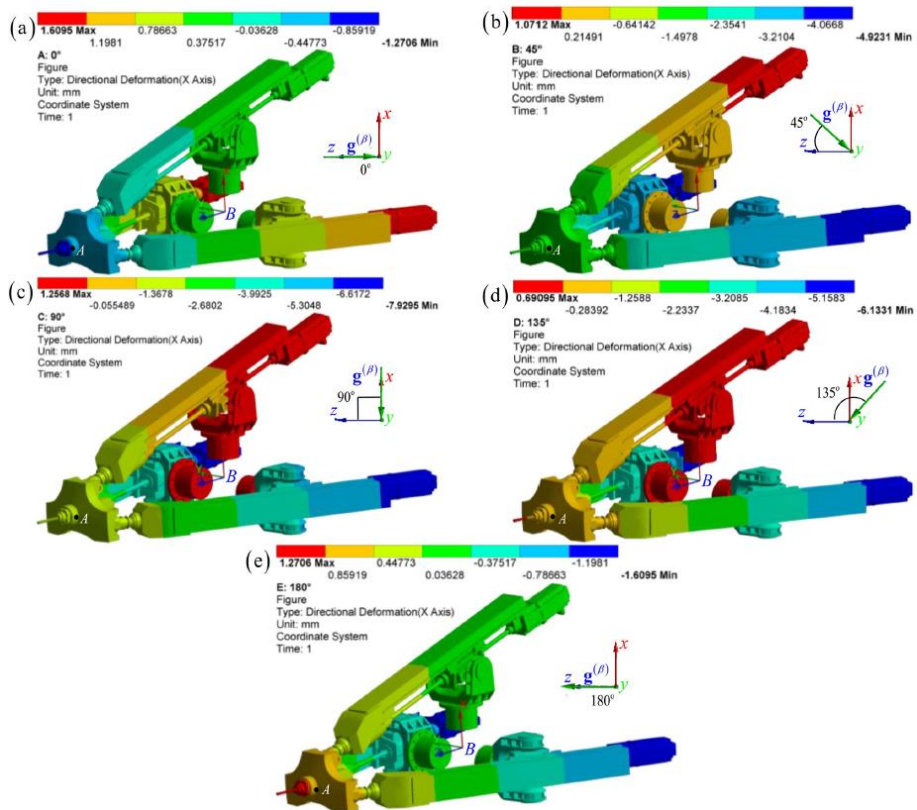


Figura 60- Análise de uma PKM em termos de deformações em x para um ângulo β de 0° (a), 45° (b), 90° (c), 135° (d) e 180° (e) (Tengfei e Jun 2018)

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Caracterização da empresa
- 3.2 Caracterização do equipamento a projetar
- 3.3 Requisitos do projeto
- 3.4 Anteprojeto
- 3.5 Projeto do equipamento

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Caracterização da empresa

A EFACEC (Figura 61) é um grupo de empresas que surgiu em 1948 com um grande foco de trabalho nos setores da engenharia, energia e mobilidade elétrica. Tem como missão gerar valor com soluções de energia, ambiente e transportes de maneira a aperfeiçoar o dia-a-dia de toda a gente, através da inclusão de diferentes competências e tecnologias inovadoras, e pessoas numa instituição que dá valor à aprendizagem e melhoria contínua.

Em 1921, de “A Moderna” originou a Electro-Moderna, Lda., sendo esta uma empresa com foco na produção de motores, geradores, transformadores e acessórios elétricos.

A 12 de Agosto de 1948 passou a ser EFME, Empresa Fabril de Máquinas Eléctricas, SARL, iniciando assim o projeto EFACEC. Nesta altura, o capital da empresa encontrava-se dividido pela Electro-Moderna, com 20%, os ACEC, Ateliers de Constructions Électriques de Charleroi, também com 20%, a CUF, Companhia União Fabril, com 45%, e os restantes 15% por acionistas.

Com a saída da CUF, os ACEC tornaram-se os acionistas majoritários, nasceu então, em 1962, o nome EFACEC, Empresa Fabril de Máquinas Eléctricas, SARL. Nesse ano, inicia-se um período de grande crescimento e no final da década de sessenta a EFACEC torna-se numa das primeiras empresas portuguesas cotadas na Bolsa de Valores de Lisboa.

Após 25 anos, na base de integração na CEE, e com a saída dos ACEC do capital social da empresa, foi iniciado um forte período de crescimento nos mercados internacionais e de consolidação do desenvolvimento tecnológico em vários domínios.

Já no século corrente, de maneira a contrariar a crise económica e financeira, foi feito um redimensionamento da estrutura internacional e simplificação do portfólio.

Durante a concessão de alguns ativos e negócios não essenciais para a EFACEC, passou então a ser designada de Efacec Power Solutions, SA. (EPS). A EPS foi criada em 14 de agosto de 2014, com o objetivo a gestão de participações sociais como forma indireta de exercício de atividades económicas.

Esta constituição da EPS foi inserida na reestruturação que a Efacec Capital, SGPS, S.A. começou a partir do final de 2013, com o objetivo de alinhar a estrutura societária do Grupo EFACEC com os segmentos de mercado abordados e as geografias-alvo.

Em finais de 2014, a Efacec Power Solutions passou a fazer parte de um grupo de empresas que reúne todos os meios de produção de competências técnicas e humanas para o desenvolvimento de atividades nos domínios das soluções de energia, ambiente, transportes e mobilidade elétrica.

Em outubro de 2015, a sociedade Winterfell Industries obteve a maioria do capital da Efacec Power Solutions e os anteriores acionistas passaram a deter uma posição minoritária no capital da empresa e foram ele Tiros novos órgãos sociais.

A Efacec encontra-se neste momento em 65 países por todo o mundo, entre eles Espanha, Brasil, Argentina, Chile, EUA, África Austral, Magrebe e Índia e conta também com um grande número de parcerias em várias áreas como a sustentabilidade, área social, e educação e tecnologia.



Figura 61- Vista aérea da EFACEC polo da Arroiteia (Efacec 2019)

3.2 Caracterização do equipamento a projetar

De maneira a suportar os trans-rupters (Figura 62) é necessária uma estrutura que esteja dimensionada de forma a conseguir suportar as solicitações impostas à estrutura provenientes do suporte dos trans-rupters. Assim sendo, a estrutura necessita de suportar o peso próprio da estrutura, o peso do trans-rupter, os momentos fletores associados à colocação do trans-rupter e força gravítica.

Como a estrutura possui elementos que podem estar energizados, quando necessário a estrutura precisa de garantir que existe distância de isolamento entre os polos dos trans-rupters, cumprindo sempre o requisito de largura máxima imposta pela legislação do país ou estado a que se destina. Contudo, durante o transporte da estrutura em trânsito, é necessário que essa largura entre polos dos trans-rupters seja reduzida de maneira a cumprir a legislação de trânsito, quando os equipamentos não estão energizados.

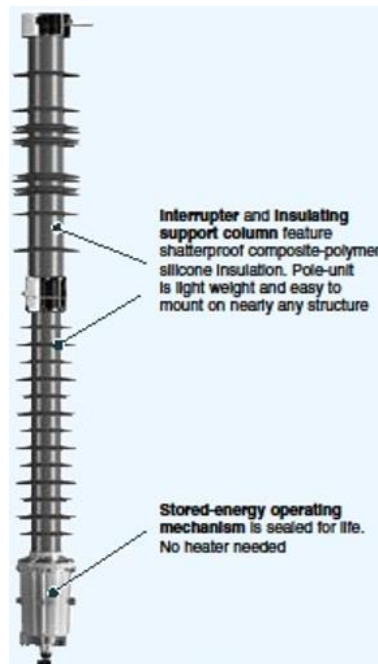


Figura 62- Trans-Rupter II® Transformer Protectors (S&C 2019)

Ainda no que toca a restrições de legislação, devido a restrições em termos de altura durante o transporte, é necessário que a estrutura em causa tenha um mecanismo que permita um ajuste de altura dos trans-rupters (Figura 63) de maneira a que as distâncias de isolamento estejam dentro dos limites e esteja a ser cumprida a legislação e requisitos.

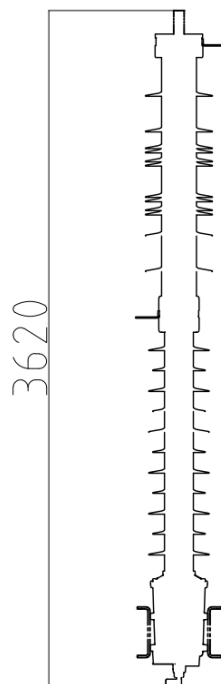


Figura 63- Altura máxima do trans-rupter

3.3 Requisitos do projeto

Para o projeto em causa existem certos requisitos que precisam de ser cumpridos sendo estes em termos de altura os seguintes:

- Altura máxima em transporte: 3200 mm;
- Altura máxima em serviço: 4140 mm.

Em termos de largura:

- Largura máxima em transporte: 3050 mm;
- Largura máxima em serviço: 4810 mm.

Para temperaturas:

- Temperatura máxima: 40°C;
- Temperatura mínima: -20°C.
- Distância de isolamento mínima entre polos: 2591 mm
- Todas as estruturas de aço devem ser protegidas contra corrosão por pintura ou por galvanização.
- E todas as estruturas de suporte das estruturas principais devem ser galvanizadas a quente.
- O equipamento apresenta cerca de 3620 mm (Figura 63) de altura e tem cerca de 150 kg de massa.

Por baixo do polo encontra-se a caixa com o motor de carregamento (Figura 64) do equipamento. Este está ligado ao equipamento através de duas chapas laterais em que a fixação é feita por 4 ligações aparafusadas.

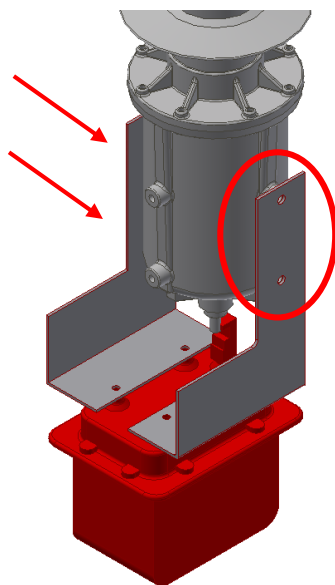


Figura 64- Motor de carregamento

3.4 Anteprojeto

3.4.1 Soluções prévias

Com os requisitos de projeto em conta, apareceram várias hipóteses de possíveis soluções. Contudo nem todas se mostraram viáveis para implementação e desenvolvimento para uma solução final. O *brainstorming* resultante levou a que se chegasse a uma solução minimamente idealizada, funcional que abrangesse todos os requisitos de projeto. De seguida apresentam-se as 3 soluções:

1ª Solução:

Para esta solução foi equacionado um sistema hidráulico de atuadores cilíndricos. Estes atuadores fazem com que os trans-rupters consigam fazer a rotação de 60° (Figura 65) necessária para a redução da altura. Em termos de localização na estrutura estes encontram-se nos braços da estrutura e estão apoiados na parte traseira, entre os perfis dos braços e, na parte frontal, entre as chapas de acoplamento do trans-rupter (Figura 66).

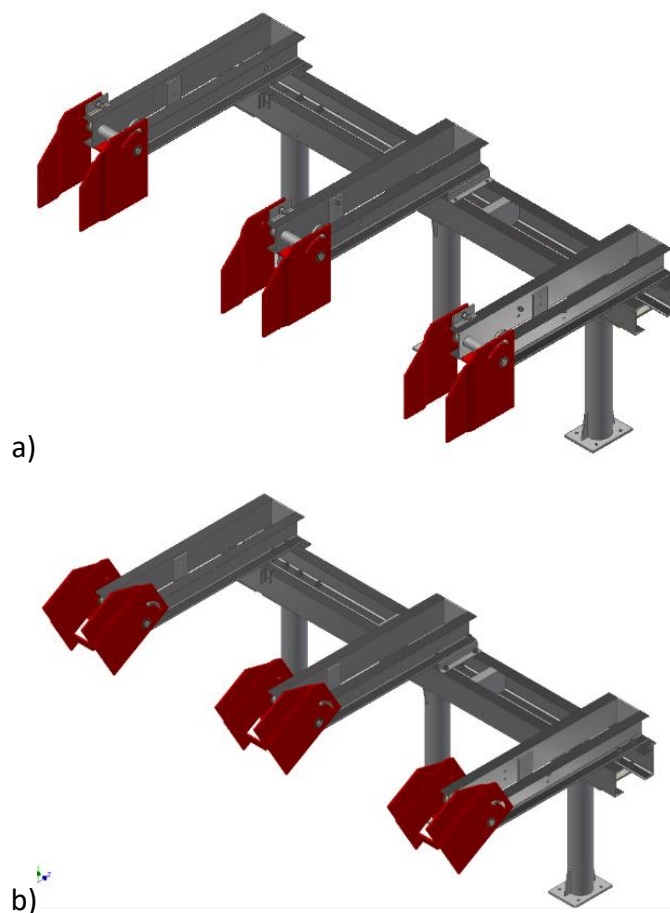


Figura 65- Estrutura em trânsito, sem rotação dos trans-rupters a) e com rotação dos trans-rupters b)

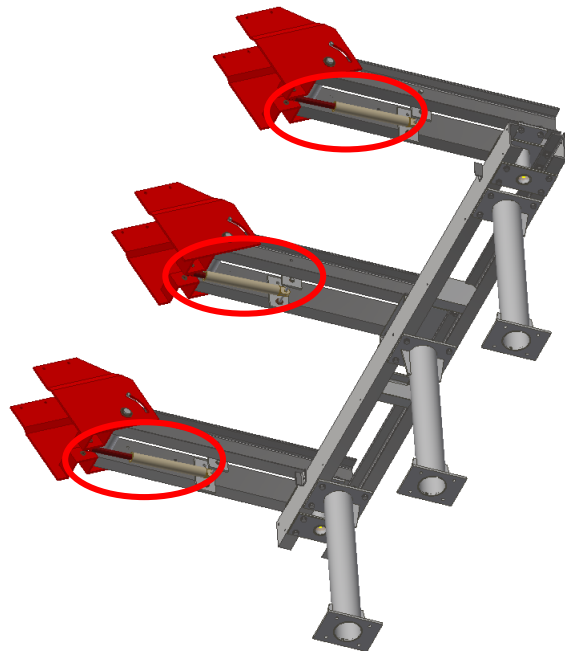


Figura 66- Localização dos atuadores pneumáticos

Deste modo, de forma a que a distância de isolamento entre os trans-rupters seja respeitada foi idealizado, em serviço, um sistema de três braços cuja rotação permita que essa distância mínima de isolamento seja cumprida.

Esses braços teriam de acomodar o trans-rupter na ponta, de modo que, para essa finalidade foi considerado utilizar duas chapas (Figura 67) com quatro furações referentes à furações já existentes no trans-rupter para o seu acoplamento.



Figura 67- Chapas de acoplamento do trans-rupter

Como em altura existe uma limitação de 3200 metros é necessário que o trans-rupter não ultrapassasse esse limite. Assim sendo, tinha de ser encontrada uma solução para reduzir a altura em que se encontravam os trans-rupters.

Foi realizado um estudo em que o maior constrangimento era a altura máxima. Deste estudo resultou que, para atingir uma altura dentro dos limites, os trans-rupters teriam de inclinar cerca de 60° (Figura 68).

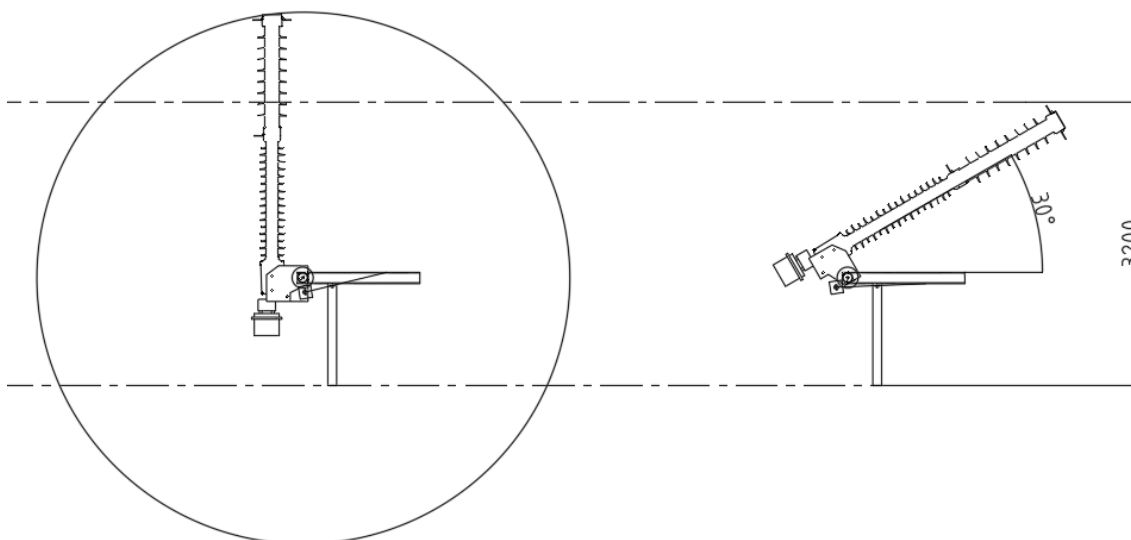


Figura 68- Estudo de inclinação do trans-rupter

Este estudo teve como base a “simulação” da estrutura considerando uma altura ao chão de desse para colocar a alavanca para o carregamento do trans-rupter.

Assim sendo, para a abertura dos braços da estrutura, é utilizado o mesmo acionamento por meio de um sistema hidráulico com atuadores cilíndricos. Os atuadores responsáveis pela abertura dos braços seriam colocados na parte traseira da estrutura, suportados por cantoneiras tendo um curso que permitisse que estes fizessem uma rotação de 90° (Figura 69).

Contudo, o sistema hidráulico iria imputar custos elevados ao equipamento e ao próprio sistema hidráulico em geral e criar a necessidade de manutenção minuciosa, o que não é mais desejável em termos de facilidade de utilização pelo utilizador final.

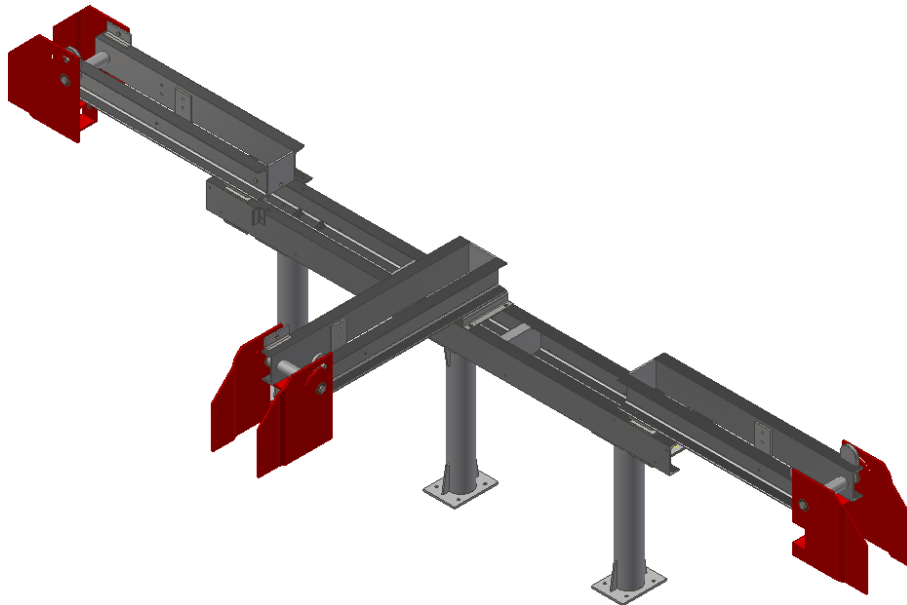


Figura 69- Estrutura em modo de serviço (aberta)

2ª Solução:

Numa segunda tentativa, foi equacionada a utilização de uma plataforma elevatória (Figura 70) de maneira a regular a altura dos trans-rupters conforme o pretendido. Esta plataforma elevatória está localizada entre os pés da estrutura e os braços (Figura 71). Posto isto, verifica-se que, em relação à primeira solução, há uma substituição da base de assentamento. A rotação dos braços é realizada através de atuadores hidráulicos como na primeira solução.

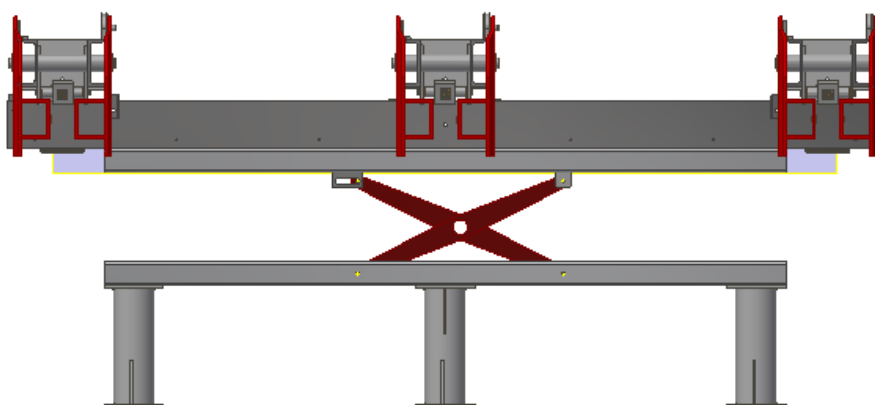


Figura 70- Plataforma elevatória

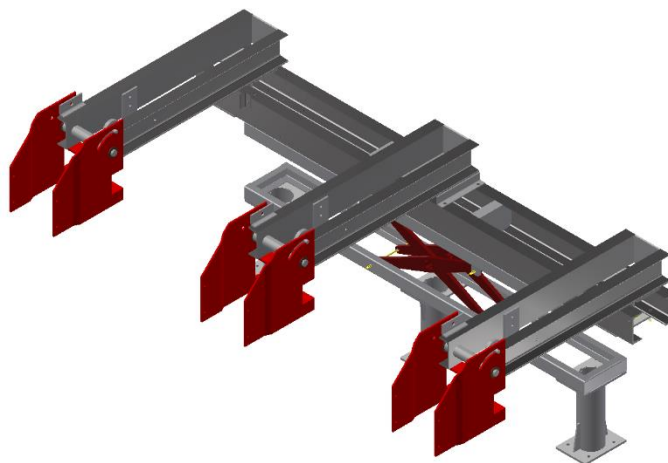


Figura 71- Estrutura com plataforma elevatória

Em termos de desvantagens, este tipo de solução apresentaria uma manutenção não tão fácil, custo elevado da plataforma e componentes do sistema hidráulico e adicionaria bastante massa à estrutura. Também traria problemas em relação ao carregamento do trans-rupter pois iria ficar um espaço demasiado pequeno na parte de baixo dos trans-rupter para a colocação da alavanca, o que levaria à necessidade de elevar sempre a plataforma para efetuar o carregamento do trans-rupter.

3ª Solução:

Numa terceira tentativa, foi equacionado um sistema de acionamento mecânico constituído por uma caixa angular e um fuso (Figura 72) acionado por uma manivela ou por algum tipo de equipamento elétrico apropriado para o efeito (Figura 73).

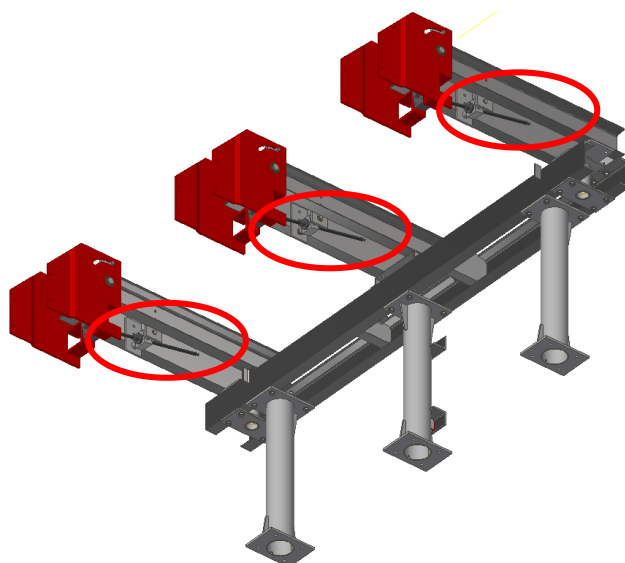


Figura 72- Localização do acionamento mecânico na estrutura

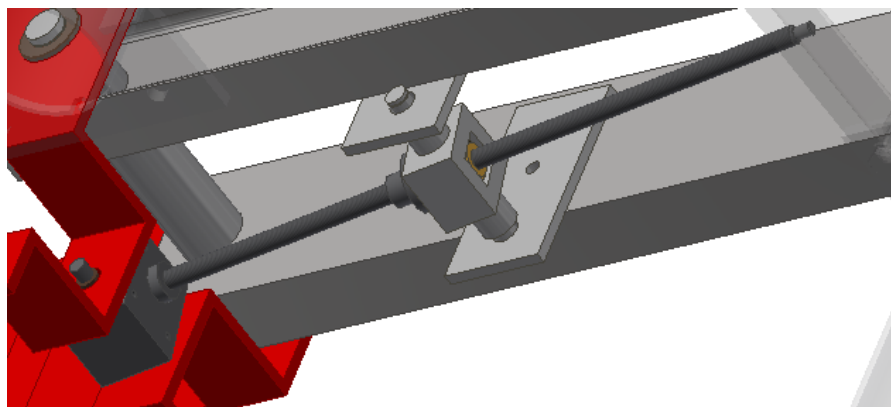


Figura 73- Sistema de acionamento mecânico

Esta solução baseia-se no pressuposto de que os braços têm de ser abertos manualmente por meio de puxadores e a rotação dos trans-rupters realizada por rotação através da caixa angular e fusos, com um acionamento pelas laterais da caixa angular (Figura 73).

O sistema de acionamento mecânico tem apoio frontal, na caixa angular, nas chapas de acoplamento do trans-rupter e apoio e guiamento no fusos por uma “caixa-guia” (Figura 73) assente em duas chapas aparafusadas a cada um dos perfis constituintes dos braços da estrutura.

Apesar de este tipo de solução se tornar economicamente viável em termos de custos e de maior facilidade de maneabilidade para o utilizador, também apresenta algumas desvantagens, como a necessidade de a caixa angular e a caixa guia estarem muito bem posicionadas de maneira a que o fusos não esteja desalinhado relativamente à caixa guia, o que pode levar a esforços não pretendidos no mesmo e até pode comprometer a funcionalidade da estrutura.

3.4.2 Tempestade de ideias

Para uma escolha da possível solução final foi necessário realizar uma análise de todas as soluções previamente apresentadas apresentado as suas vantagens e desvantagens e por realização de uma análise SWOT das mesmas.

Para a primeira solução, foi realizada a seguinte análise SWOT:

Forças: <ul style="list-style-type: none">• Acionamento automatizado;• Montagem rápida;• Facilidade de obtenção e componentes;• Manuseamento simples.	Fraquezas: <ul style="list-style-type: none">• Suscetível a vibrações;• Específica para o transrupter;• Necessidade de manutenção minuciosa.• Maior custo.
Oportunidades: <ul style="list-style-type: none">• Otimizações a nível de massa e geometria;• Criação de reforços;• Investimento.	Ameaças: <ul style="list-style-type: none">• Defeitos em soldaduras;• Má lubrificação dos atuadores hidráulicos.

Para a segunda solução, foi realizada a seguinte análise SWOT:

Forças: <ul style="list-style-type: none">• Manuseio simples;• Acionamento automatizado;• Não necessita de sistema de rotação.	Fraquezas: <ul style="list-style-type: none">• Suscetível a vibrações;• Específica para o transrupter;• Necessidade de manutenção minuciosa;• Maior custo.
---	--

Oportunidades: <ul style="list-style-type: none">• Otimizações a nível de massa e geometria;• Criação de reforços;• Investimento.	Ameaças: <ul style="list-style-type: none">• Defeitos em soldaduras;• Má lubrificação do sistema hidráulico;• Montagem mais difícil;
--	---

Para o caso da terceira solução, foi realizada a seguinte análise SWOT:

Forças: <ul style="list-style-type: none">• Fácil maneabilidade;• Montagem rápida;• Facilidade de obtenção e componentes;• Economicamente e ambientalmente viável.	Fraquezas: <ul style="list-style-type: none">• Suscetível a vibrações;• Específica para o trans-rupter;• Ajustamento manual;• Necessidade de armazenamento da manivela.
Oportunidades: <ul style="list-style-type: none">• Otimizações a nível de massa;• Criação de reforços;• Investimento;• Automatização.	Ameaças: <ul style="list-style-type: none">• Defeitos em soldaduras;• Não haver concentricidade entre caixa guia e o fuso.

3.5 Projeto do equipamento

3.5.1 Solução final

Através de conversações com a empresa, que demonstrou um maior interesse numa solução de acionamento manual, foi escolhida a terceira solução como sendo o ponto de partida para o desenvolvimento da solução final. Deste modo, é então realizada uma descrição breve dos maiores subconjuntos que constituem a solução final para a estrutura.

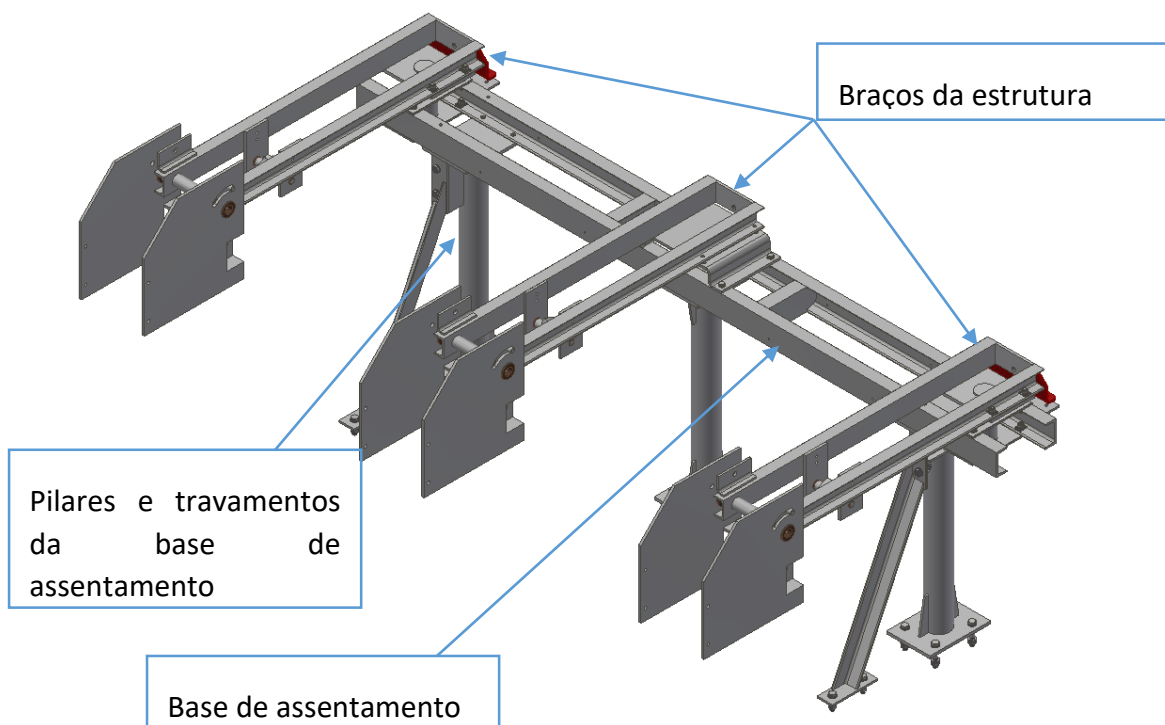


Figura 74- Solução final para a estrutura

Em termos de função destes subconjuntos, em primeiro lugar, os braços da estrutura (Figura 74) têm como função o suporte dos trans-rupters, permitir a rotação dos trans-rupters de maneira a diminuir a altura. Esta rotação é realizada por um sistema único composto por uma caixa angular e um fuso, denominado *screw jack*. Para a situação de serviço, quando os trans-rupters se encontram energizados, abrir de maneira a que seja criada uma distância de isolamento entre os polos dos trans-rupters.

A base de assentamento (Figura 74) tem como função suportar os braços da estrutura e acomodar os sistemas que permitem a rotação de abertura dos braços da estrutura. Esta base de assentamento é suportada por 3 pilares (Figura 74) que são complementados por travamentos que têm como função reduzir as vibrações associadas ao transporte da estrutura.

3.5.2 Seleção de materiais

De maneira a facilitar a construção da estrutura em termos práticos e financeiros, decidiu-se considerar os aços de construção S235JR, S275JR e S355JR, segundo a norma EN 10025-2, para os perfis e maior parte das peças metálicas utilizadas.

Destes 3 materiais foi selecionado o aço S275JR. Apesar de o aço S235JR ser um aço de construção muito comum e de fácil obtenção, este apresenta propriedades mecânicas inferiores ao aço S275JR, sendo preferível utilizar o S275JR (Figura 28) de maneira a ter uma maior fiabilidade estrutural visto que os trans-rupters são equipamentos de custo elevado e componentes sensíveis ao choque no caso de instabilidade estrutural ou colapso da estrutura.

Como existe a possibilidade de a estrutura estar exposta ao meio ambiente, estes componentes metálicos necessitam de ser submetidos a um tratamento de galvanização de maneira a criar uma proteção contra a corrosão.

Devido à existência de rotação em algumas partes móveis do mecanismo, é necessária a utilização de casquilhos constituídos por um material que, em contacto com o aço, não provoque desgaste. Deste modo, foi escolhida a liga de bronze e estanho CB3 (Figura 75) para todos os casquilhos da estrutura. Este bronze apresenta uma boa resistência ao desgaste, boa resistência à corrosão e é adequado para grandes velocidades e aguenta cargas elevadas (CONTIBRONZES 2018, UNIDOMAF 2018).

CB3

Norma: CC483K

Normas internacionais: + info

Composição em % (fracção de massa)

	% min.	% máx
Cu ^d	85	88,5 ^c
Ni		2
P ^d		0,6
Pb		0,7
Sn	11	13
Zn		0,5
Al		0,01
Fe		0,2
Mn		0,2
S		0,05
Sb		0,15
Si		0,01

CB3

Norma: CC483K

Densidade kg/dm ³	8,6
Calor específico J/g. K	0,376
Expansão térmica 10-6 K	18,5
Condutividade térmica W/m. °K	54
Condutividade eléctrica m / (Ohm.mm ²)	6,2

CB3

Norma: CC483K

Processo de moldagem e designação	GC	GZ
Tensão de Ruptura R _m N/mm ² min.	300	280
Limite Elástico 0,2% R _{p0,2} N/mm ² min.	150	150
Alongamento A % min.	6	5
Dureza Brinell HBW min.	90	90

Figura 75- Tabelas de propriedades físicas do bronze ao estanho CB3 (CONTIBRONZES 2018)

3.5.3 Métodos de dimensionamento utilizados

O dimensionamento da estrutura de suporte dos trans-rupters foi realizado através do MEF por meio do módulo *Environments* > *Stress Analysis* do programa Autodesk Inventor (Figura 76).

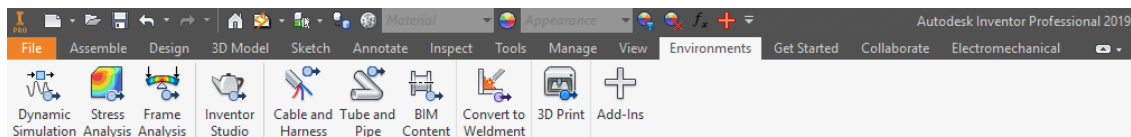


Figura 76- Módulo de análise pelo MEF do Autodesk Inventor

Foi escolhido este método de maneira a ser possível obter uma previsão do comportamento da estrutura de suporte do trans-rupter após imposição das solicitações resultantes da colocação do trans-rupter. Como a estrutura está maioritariamente sujeita a solicitações estáticas, foi determinado realizar uma análise estática da estrutura (Figura 77).

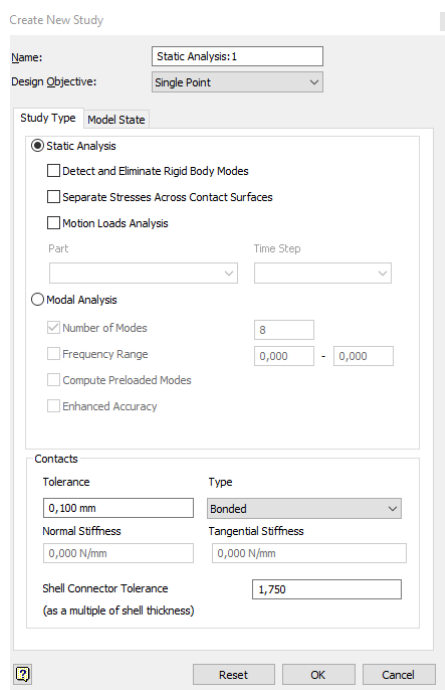


Figura 77- Condições iniciais da análise pelo MEF

Deste modo, para análise da estrutura, os campos a analisar foram as tensões equivalentes de von Mises, os deslocamentos e coeficiente de segurança. De modo a garantir uma maior segurança da estrutura a todos os tipos de ações, foi considerado um valor mínimo para o coeficiente de segurança de 1,5.

Para além de ser necessário realizar uma análise crítica aos resultados obtidos e comportamento da estrutura, é necessário também verificar se existe uma convergência (Figura 78) dos valores de tensões equivalentes de von Mises e deslocamentos. A convergência é realizada através várias iterações de refinamento da malha e, após consulta com a Autodesk, a percentagem de convergência a ter em consideração é de 10% para que os valores possam ser tidos em conta como realistas.

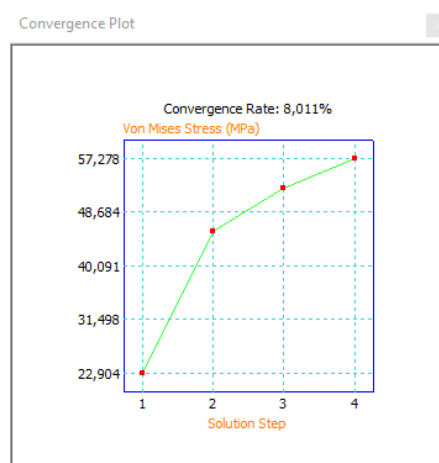


Figura 78- Curva de convergência

Para que as furações nos componentes em chapa da estrutura estivessem em conformidade foi utilizado os critérios de dimensionamento de ligações aparafusadas presentes no Eurocódigo 3-parte 8 e na norma EN 4014:2011.

Para o caso de componentes normalizados foram seguidas as normas de material que corresponde a cada tipo de componentes:

- Para o aço escolhido, foi utilizada a norma EN10025-2;
- Para os perfis laminados a quente foi utilizada a norma dimensional DIN 1026 e para a normal material foi utilizada a EN 10025;
- Para os parafusos foi escolhida a norma ISO 4014/DIN 931, para as porcas foi utilizada a DIN 934, para anilhas foi escolhida a norma DIN-125 A2, para placas oblíquas foi utilizada a DIN 434;
- Para as chapas a norma dimensional considerada foi a EN 10029 / EN 10051 e para a norma material foi a EN 10025;
- Para as chavetas do *screw jack* foi tida em consideração a norma DIN 6885 A.

3.5.4 Projeto da estrutura

3.5.4.1 Braços da estrutura

Para o projeto da estrutura (Figura 79), uma vez que a maior preocupação é que os braços fossem resistentes à flexão, devido ao momento gerado pelo comprimento do

braço e peso do trans-rupter, foi determinado que os braços iriam ser constituídos por perfis UPN.

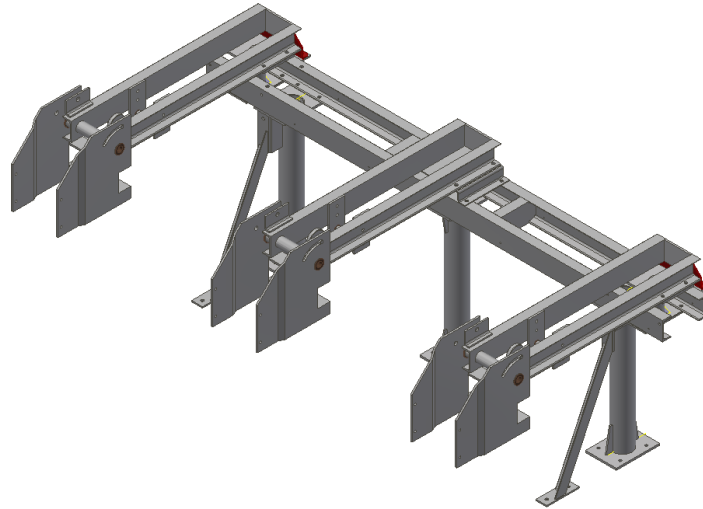


Figura 79- Estrutura rotativa de suporte de trans-rupter

Em termos de constituição da estrutura, em primeiro lugar, foram utilizados dois perfis UPN120 de maneira a obter uma grande inércia nos braços da estrutura (Figura 80) para contrariar a flexão resultante da colocação do trans-rupter.

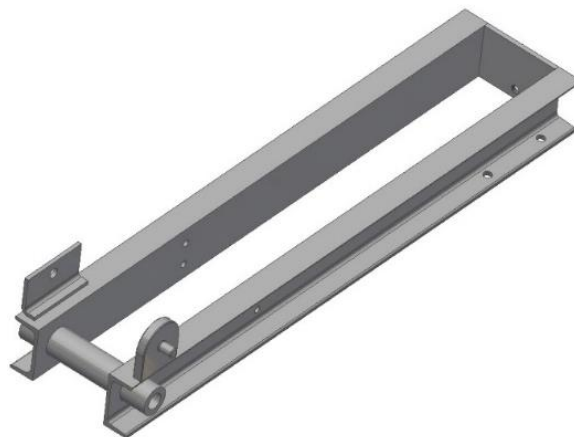


Figura 80- Braço da estrutura

Estes dois perfis UPN estão unidos entre si por uma chapa soldada a ambos os perfis na parte traseira e por um perfil tubular na parte da frente (Figura 80), também soldado a ambos os perfis UPN, para poder acomodar um veio de união do sistema das chapas de acoplamento do trans-rupter (Figura 81).

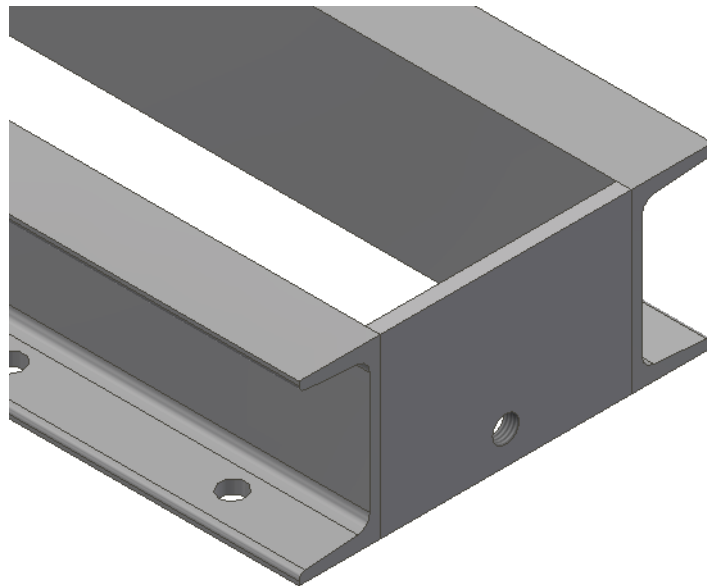


Figura 81 - Chapa traseira do braço da estrutura

É possível verificar a existência de algumas furações para a caixa guia do fuso (Figura 82), na parte interior dos perfis, e na traseira para fixação à base de assentamento da estrutura.

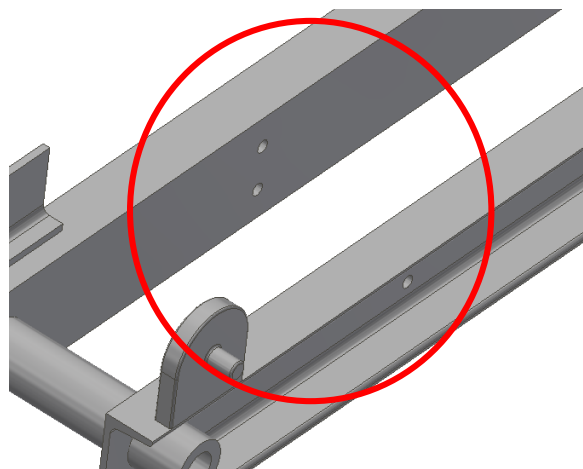


Figura 82- Furações para fixação da caixa guia

Estas furações foram realizadas conforme o Eurocódigo 3 parte 8 e ISO 4014/DIN 931 (Tabela 14). Para as furações traseiras é utilizado um parafuso M16 o que leva a que seja necessário utilizar um furo médio de 18 mm de diâmetro com ajustamento H13 (Figura 83).

Tabela 14- Geometria dos parafusos (CEN 2011, Fonseca 2018)

EN ISO 4014 - Geometria dos parafusos							
Símbolo	d (mm)	d ₀ (mm)	e (mm)	s (mm)	As (mm ²)	K (mm)	A (mm ²)
Denominação	Diâmetro nominal	Diâmetro do furo	Maior dimensão da cabeça (diagonal)	Menor dimensão da cabeça (faces planas)	Área útil (rosca)	Altura da cabeça	Área total (liso)
M8	8	9	14.38	13	36.6	5.30	50.27
M10	10	11	17.77	16	58	6.40	78.54
M12	12	13	20.03	18	84.3	7.50	113.10
M14	14	15	23.36	21	115	8.80	153.94
M16	16	18	26.75	24	157	10.00	201.06
M18	18	20	30.14	27	192	11.50	254.47
M20	20	22	33.53	30	245	12.50	314.16
M22	22	24	37.72	34	303	14.00	380.13
M24	24	26	39.98	36	353	15.00	452.39
M27	27	30	45.20	41	459	17.00	572.56
M30	30	33	50.85	46	561	18.70	706.86
M33	33	36	55.37	50	694	21.00	855.30
M36	36	39	60.79	55	817	22.50	1017.88
M39	39	42	66.44	60	976	25.00	1194.59
M42	42	45	71.30	65	1120	26.00	1385.44
M45	45	48	76.95	70	1288	28.00	1590.43
M48	48	51	82.60	75	1473	30.00	1809.56
M52	52	55	88.25	80	1719	33.00	2123.72
M56	56	59	93.56	85	2030	35.00	2463.01
M60	60	63	99.21	90	2289	38.00	2827.43
M64	64	67	104.86	95	2675	40.00	3216.99



Figura 83- Furações traseiras dos perfis dos braços da estrutura

Assim sendo, as furações teriam de respeitar em termos de dimensões o Eurocódigo 3 parte 8. Através da consulta do Eurocódigo foram retiradas as fórmulas de cálculo das dimensões que as furações têm de ter às extremidades e entre eixos das furações (Tabela 15) e respetiva nomenclatura das distâncias (Figura 84).

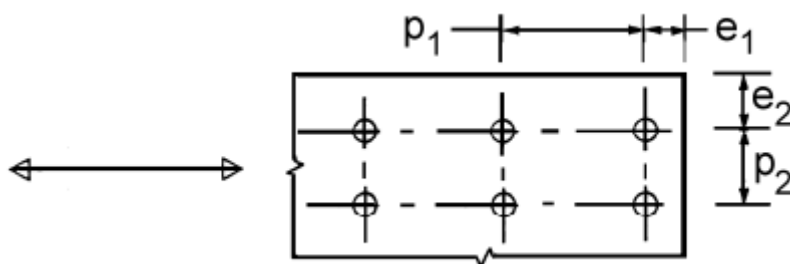


Figura 84- Nomenclaturas das distâncias entre eixos e às extremidades das furações

Tabela 15-Distâncias às extremidades e entre eixos das furações (CEN 2010)

Distâncias e entreeixos, ver a Figura 3.1	Mínimo	Máximo ^{1) 2) 3)}		
		Estruturas feitas de aços respeitando a EN 10025 com exceção dos aços respeitando a EN 10025-5		Estruturas feitas de aços conformes à EN 10025-5
		Aço exposto à atmosfera ou a outras influências corrosivas	Aço não exposto à atmosfera ou a outras influências corrosivas	Aço utilizado sem protecção
Distância à extremidade e_1	$1,2d_0$	$4t + 40$ mm		O maior dos valores $8t$ ou 125 mm
Distância ao bordo lateral e_2	$1,2d_0$	$4t + 40$ mm		O maior dos valores $8t$ ou 125 mm
Distância e_3 para furos ovalizados	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Distância e_4 para furos ovalizados	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Distância entre eixos p_1	$2,2d_0$	O menor dos valores $14t$ ou 200 mm	O menor dos valores $14t$ ou 200 mm	O menor dos valores $14t_{\min}$ ou 175 mm
Distância entre eixos $p_{1,0}$		O menor dos valores $14t$ ou 200 mm		
Distância entre eixos $p_{1,i}$		O menor dos valores $28t$ ou 400 mm		
Distância entre eixos p_2 ⁵⁾	$2,4d_0$	O menor dos valores $14t$ ou 200 mm	O menor dos valores $14t$ ou 200 mm	O menor dos valores $14t_{\min}$ ou 175 mm

¹⁾ Não existem valores máximos tanto para as distâncias entre eixos dos furos como para as distâncias à extremidade e ao bordo lateral, excepto nos seguintes casos:
– para elementos comprimidos a fim de evitar a encurvadura local e impedir a corrosão dos elementos expostos (os valores limites são fornecidos neste Quadro); e
– para elementos traccionados expostos a fim de impedir a corrosão (os valores limites são fornecidos neste Quadro).

²⁾ A resistência ao enfunamento local da chapa comprimida entre as peças da ligação deverá ser calculada de acordo com a EN 1993-1-1, utilizando $0,6 p_1$ para comprimento de encurvadura. Não é necessário verificar o enfunamento local entre as peças de ligação no caso de p_1/t ser inferior a $9e$. A distância ao bordo lateral não deverá exceder os requisitos relativos ao enfunamento para um elemento saliente de uma peça comprimida, ver a EN 1993-1-1. A distância à extremidade não é afectada por este requisito.

³⁾ t espessura da peça exterior ligada de menor espessura.

⁴⁾ Os limites das dimensões dos furos ovalizados são indicados em 1.2.7 - Norma de referência, Grupo 7.

⁵⁾ Para linhas de peças de ligação dispostas em quincôncio, poderá utilizar-se um espaçamento mínimo entre linhas de $p_2 = 1,2d_0$, desde que a distância mínima, L , entre quaisquer duas peças de ligação seja igual ou superior a $2,4d_0$, ver a Figura 3.1b).

Deste modo, através da aplicação dos critérios do Eurocódigo (Tabela 15) foram obtidos os seguintes resultados para as furações traseiras dos perfis (Figura 85):

$$e_1 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$p_1 = 2,2 * 18 = 39,6 \text{ mm}$$

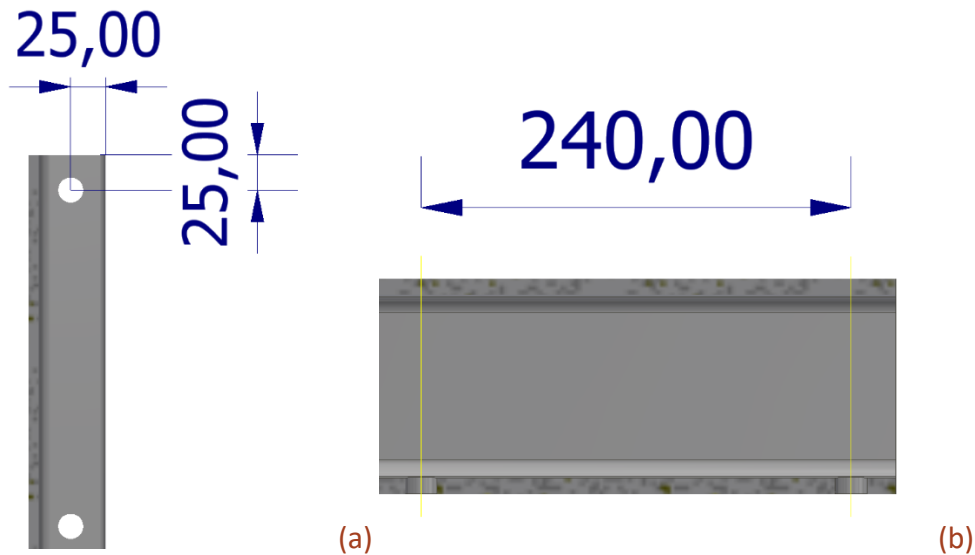


Figura 85- Distâncias dos furos às extremidades (a) e entre eixos das furações (b)

Para os furos centrais (Figura 86), foram utilizados parafusos M12. Na norma NORMA EN 4014 refere que o a dimensão nominal do furo, d_0 , teria de ser 13 mm, contudo, devido à galvanização para as estruturas presente nos requisitos de projeto, foi considerada uma furação de diâmetro nominal 14 mm com ajustamento H13. Para tal, por aplicação dos critérios do Eurocódigo (Tabela 15) obtiveram-se os seguintes resultados:

$$e_1 = 1,2 * 14 = 16,8 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1,2 * 14 = 16,8 \text{ mm}$$

$$p_1 = 2,2 * 14 = 30,8 \text{ mm}$$

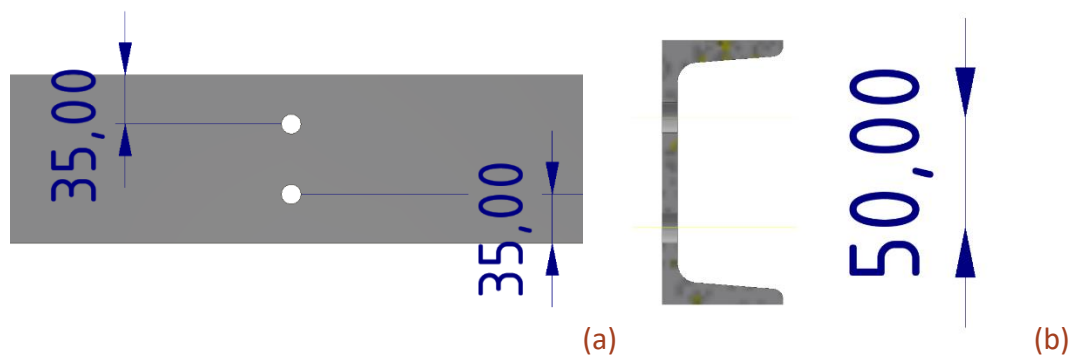


Figura 86- Distâncias dos furos às extremidades (a) e entre eixos das furações (b)

De maneira a ligar o braço à estrutura, e para que ao mesmo tempo houvesse a possibilidade de rotação do mesmo, foi projetada uma chapa de 12 mm (Tabela 16) com um veio soldado (Figura 87). A chapa e o veio encontram-se unidos por soldadura na parte central da chapa em ambas as faces da mesma.

Tabela 16- Dimensões de chapa laminada a quente (CHAGAS)

Espessura MM	Dimensão da Chapa				
	2 x 1	2,5 x 1,25	3 x 1,5	6 x 1,5	6 x 2
2	31,68	49,36	71,33	142,66	190,08
2,5	39,59	62,24	89,16	178,32	237,54
3	47,55	74,30	106,99	214,69	285,29
4	63,40	99,07	142,65	285,30	380,40
5	79,25	123,83	178,32	356,64	475,50
6	95,10	148,60	213,98	427,96	570,60
8	128,00	200,00	288,00	576,00	768,00
10	160,00	250,00	360,00	720,00	960,00
12	192,00	300,00	432,00	864,00	1152,00
14	224,00	350,00	504,00	1008,00	1344,00
16	256,00	400,00	576,00	1152,00	1536,00
18	288,00	450,00	648,00	1296,00	1728,00
20	320,00	500,00	720,00	1440,00	1920,00
22	352,00	550,00	792,00	1584,00	2112,00
25	400,00	625,00	900,00	1800,00	2400,00
30	480,00	750,00	1080,00	2160,00	2880,00
40	640,00	1000,00	1440,00	2880,00	3840,00
50	800,00	1250,00	1800,00	3600,00	4800,00
60	960,00	1500,00	2160,00	4320,00	5760,00
80	1280,00	2000,00	2880,00	5760,00	7680,00
100	1600,00	2500,00	3600,00	7200,00	9600,00

Na parte inferior da chapa criada há uma geometria de degrau de maneira a que o casquilho de bronze onde o veio desta peça irá estar inserido não encoste na soldadura com o risco de a poder danificar.

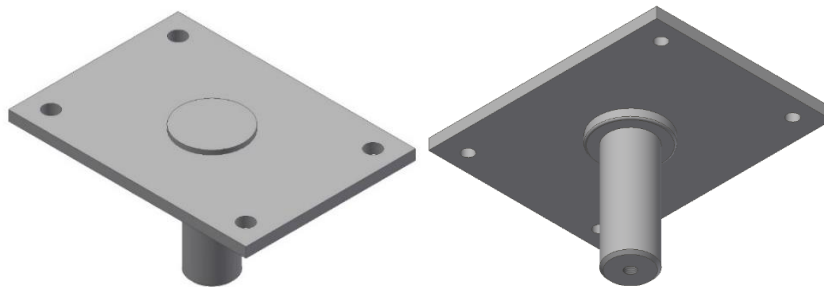


Figura 87- Fixação braço lateral

Para as furações de diâmetro 18 mm foram obtidos os seguintes resultados:

$$e_1 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$p_1 = 2,2 * 18 = 39,6 \text{ mm}$$

$$p_2 = 2,4 * 18 = 43,2 \text{ mm}$$

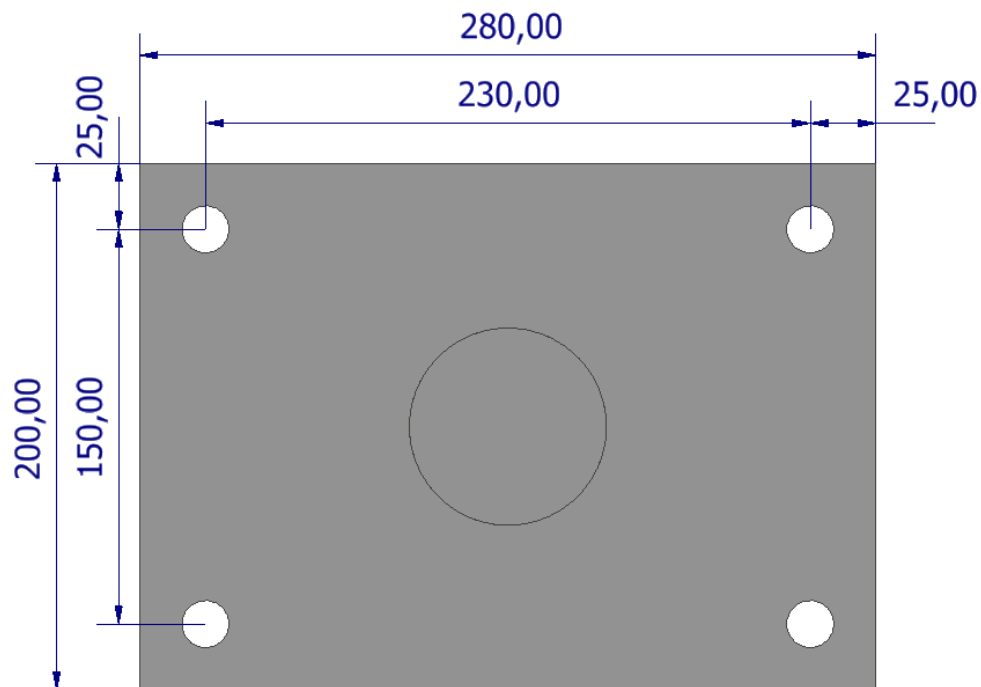


Figura 88- Distâncias dos furos às extremidades e entre eixos das furações

Para que o braço estivesse fixo à estrutura de base em ambas as posições de serviço e em trânsito, utilizou-se uma chapa quinada de 10 mm (Figura 89) com uma furação que fixa na chapa traseira do braço lateral e duas furações para fixar na base de assentamento.

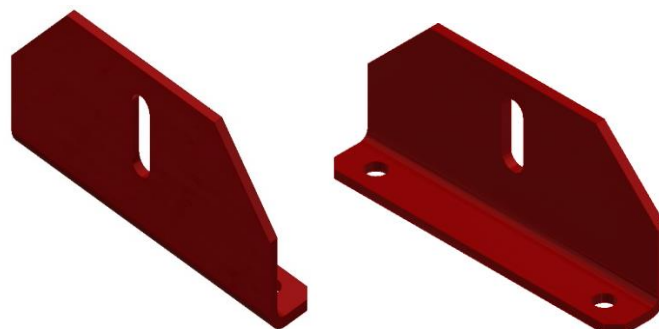


Figura 89- Chapa de fixação do braço para base de assentamento

Foram feitos chanfros na chapa (Figura 89) de modo a que quando o braço estivesse a ser rodado, não existissem quinas vivas pondo em risco a segurança do utilizador. Esta chapa apresenta ainda um furo oblongo de forma a evitar problemas no caso de não existir concentricidade entre esta chapa e o braço da estrutura.

Para a posição das furações de 18 mm (Figura 90) foram utilizados os critérios do Eurocódigo (Tabela 15):

$$e_1 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$p_1 = 2,2 * 18 = 39,6 \text{ mm}$$

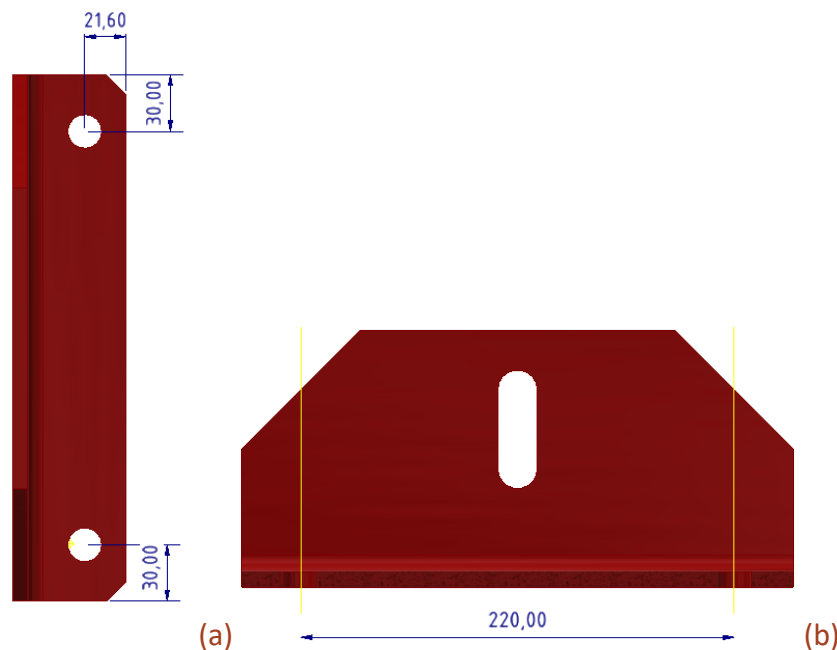


Figura 90- Chapa de fixação dos braços laterais

Foram também projetadas duas peças, uma para a fixação da posição do trans-rupter (Figura 91) e outra para controlo da rotação (Figura 92).

Para o primeiro caso, foi utilizada uma chapa quinada com uma furação para fixação através de uma ligação aparafusada (Figura 91).

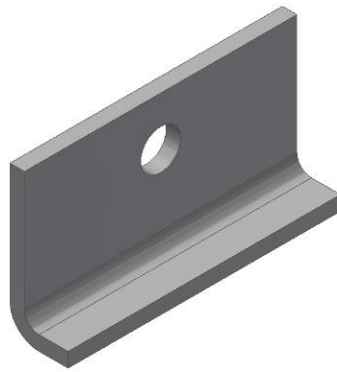


Figura 91- Chapa de fixação

Para o segundo caso, foi utilizada uma peça com um veio (Figura 92) a servir de indicador para a rotação do trans-rupter, de maneira ao utilizador ter noção dos limites de rotação necessários.

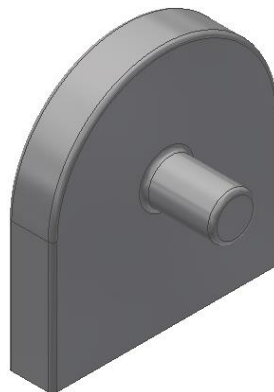


Figura 92- Peça para controlo de rotação

Assim sendo, como é possível verificar na Figura 93, a configuração com que o braço fica após aplicação dos componentes referidos.



Figura 93- Braço lateral da estrutura

De seguida, foi pensado o sistema de acoplamento do trans-rupter no braço da estrutura (Figura 94). Este sistema é composto por duas chapas laterais quinadas na parte frontal de maneira a fixar o trans-rupter nos quatro pontos de fixação por ligações aparafusadas.



Figura 94- Chapas de acoplamento do trans-rupter

Na parte traseira superior existem duas furações com casquilho (Figura 95) para passar o veio que faz a ligação com o braço através do perfil tubular presente nele. Também na parte superior é possível verificar uma ranhura numa das chapas e duas furações para fixação do trans-rupter a 90° ou 60°.

Na parte inferior das chapas (Figura 95) verifica-se que existem dois rasgos onde são soldadas posteriormente duas chapas quinadas. Estas chapas têm como objetivo acomodar o redutor do sistema de acionamento de rotação dos trans-rupters.

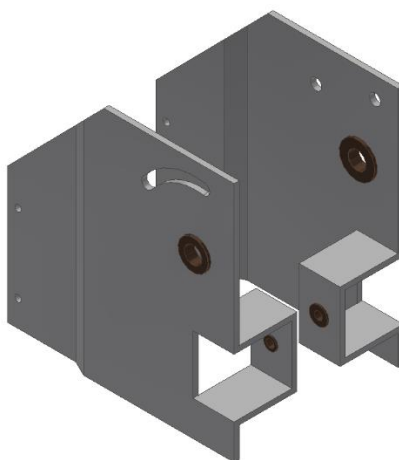


Figura 95- Chapas de acoplamento do trans-rupter

Nessas chapas (Figura 95) é possível observar que existem duas furações na parte inferior com o casquilho para passar os veios da caixa redutora. Estes casquilhos foram considerados em bronze de maneira a evitar o desgaste por contacto entre peças de aço.

Montando os componentes referidos, é possível observar a configuração que os braços laterais da estrutura têm (Figura 96). No caso do braço central (Figura 97), como não existe a necessidade de ocorrer rotação, não é necessário existir a base com veio no braço central.

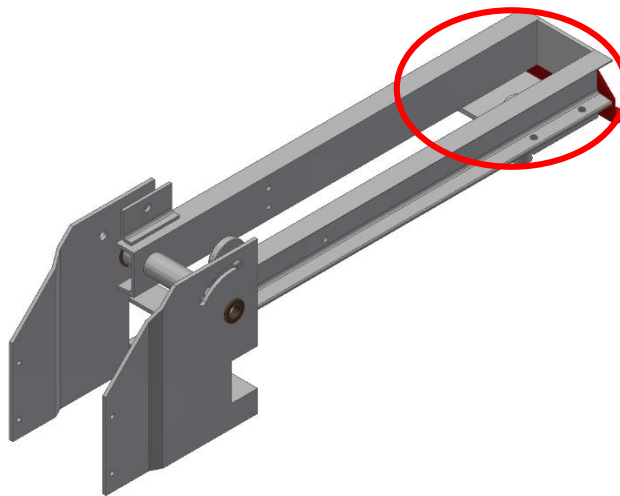


Figura 96- Braço lateral da estrutura

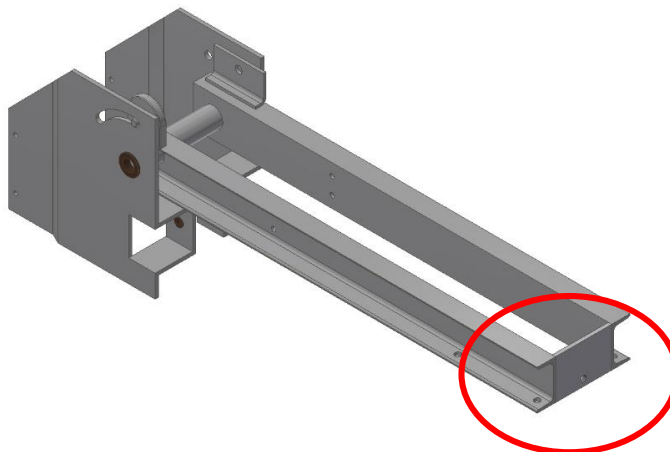


Figura 97- Braço central da estrutura

O aço considerado para as simulações foi o S275JR, segundo a norma EN10025-2, devido ao facto de ser um aço que existe com abundância no mercado e com boas propriedades mecânicas.

Após as considerações iniciais de projeto, é realizado o dimensionamento e análise da estrutura pelo MEF.

As superfícies em contacto entre os vários componentes do braço, sem existência de movimento entre eles, são assumidas como tendo uma ligação fixa, soldada ou aparafusada, denominada *Bonded* no programa utilizado, que cria uma ligação rígida entre as faces dos componentes em que existe o contacto, simulando uma soldadura ou ligação aparafusada.

Numa primeira fase, foram analisados os braços da estrutura (Figura 98), em termos de concentração de tensões equivalentes de von Mises, deslocamentos, fator de segurança e massa. Dentro desta análise, em primeiro lugar, foi colocada a força gravítica com o valor de $9810,000 \text{ mm/s}^2$ a incidir na estrutura. De seguida, de maneira a simular o trans-rupter sem ter de colocar o modelo do equipamento no modelo da estrutura, foi colocada uma *Remote Force* de 1500 N, colocada nas furações onde é acoplado o trans-rupter, correspondente aos 150 kg do equipamento, entre as duas chapas de acoplamento do equipamento (Figura 98).

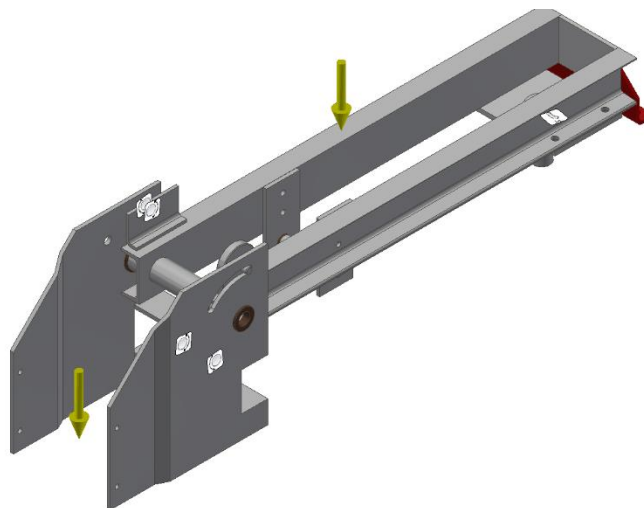


Figura 98- Forças e restrições aplicadas no braço lateral da estrutura

Em termos de restrições, foram colocadas restrições de encastramento, denominadas *Fixed* no programa utilizado, para simular as zonas de fixação dos braços restringidas em todos os graus de liberdade, (Figura 99) e *Pin* para simular zonas de ligações do tipo pino como seria onde se encontram a caixa redutora e a fixação de posição das chapas de acoplamento do trans-rupter (Figura 100).

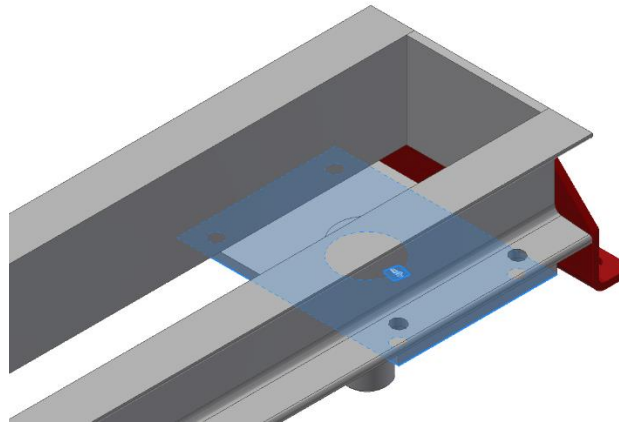


Figura 99- Zona de restrição *Fixed* do braço lateral da estrutura

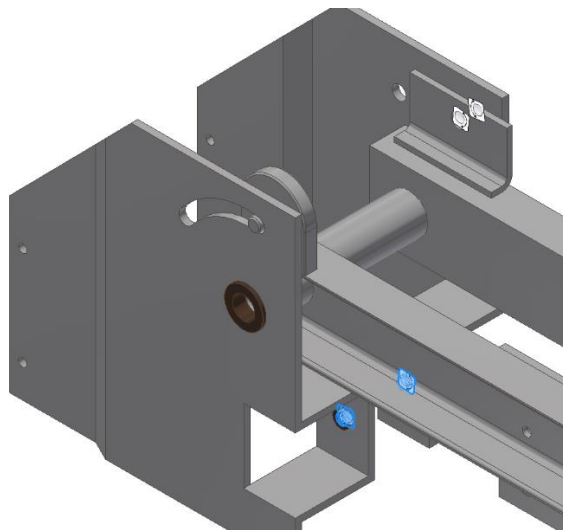


Figura 100-Zonas de restrição do tipo pino do braço lateral da estrutura

O passo seguinte foi criar a malha, fazendo a discretização (Figura 101), de maneira a conter um número de elementos suficientes para a realização da análise sem que aumentasse em demasia o tempo de análise, mas que mantivesse uma boa precisão de resultados.

Deste modo, criando uma malha com elementos curvos e com base no tamanho do componente em que estão inseridos, foi obtida uma malha com 75004 elementos. Estes elementos são criados automaticamente pelo programa que, por predefinição, escolhe o elemento tridimensional tetraédrico (Figura 101).

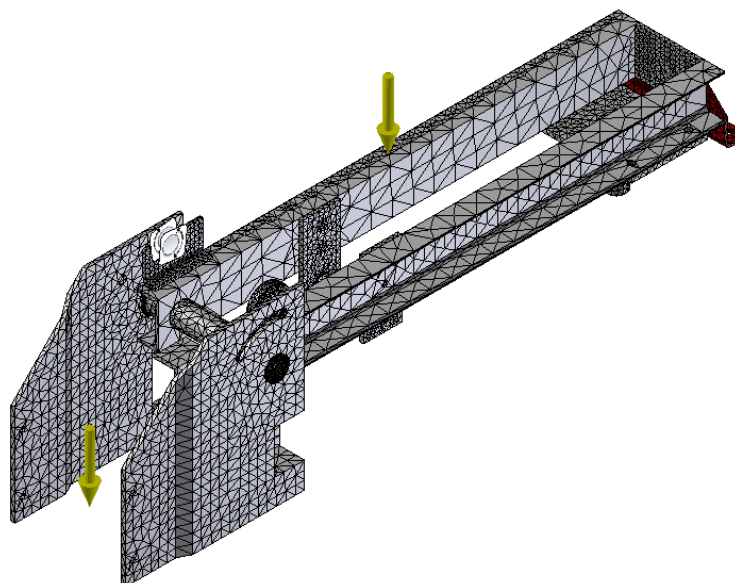


Figura 101- Modelo com malha criada

Na primeira simulação foi só considerado o braço da estrutura de maneira a simplificar as simulações e leitura de resultados. Foram obtidos os resultados que se apresentam de seguida.

Para as tensões equivalentes de von Mises foi atingido um valor máximo de 61,81 MPa (Figura 102). Estas encontram-se localizadas no casquilho superior na chapa de acoplamento do trans-rupter (Figura 103).

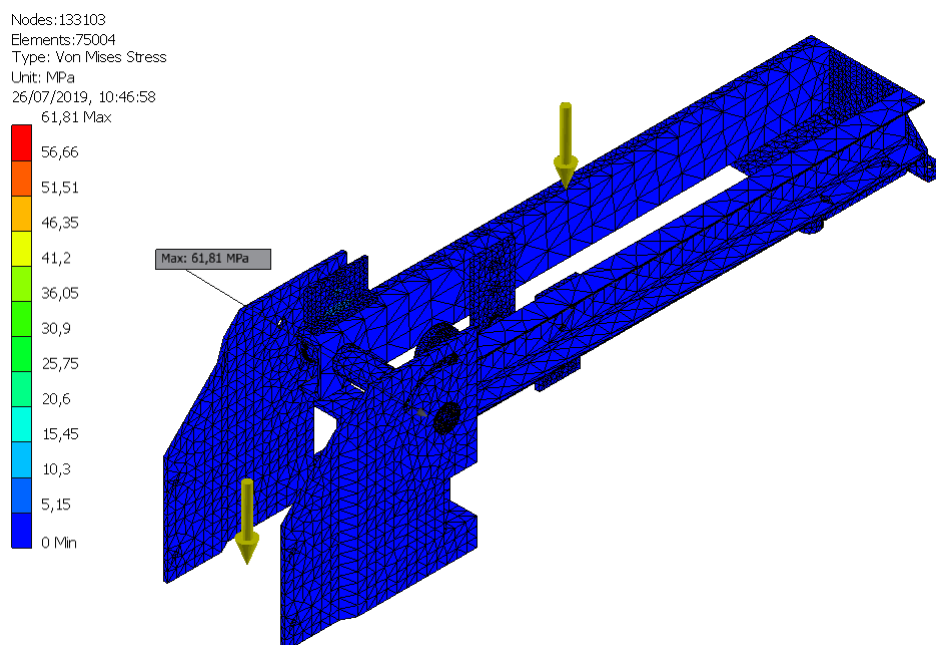


Figura 102- Tensões máximas de von Mises

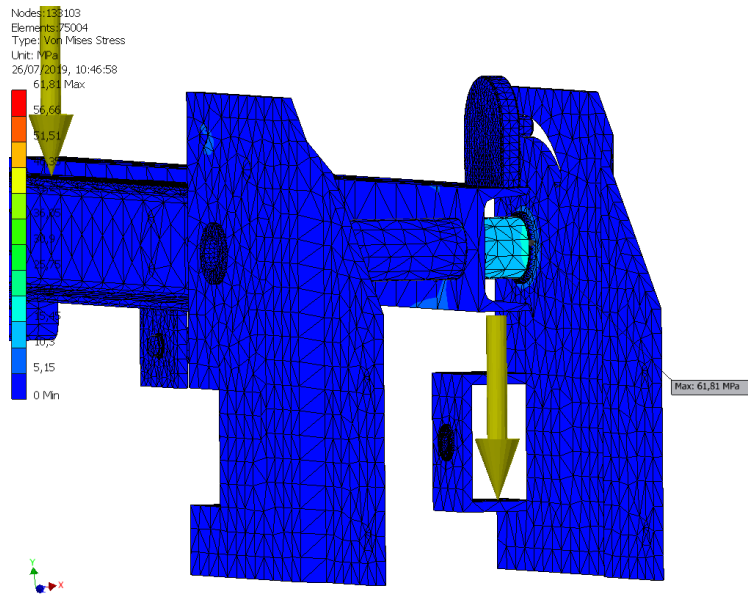


Figura 103-Localização da tensão máxima de von Mises

É possível observar a existência de tensões com algum significado no tubo na parte superior (Figura 103). No entanto, o valor destas tensões não é significativo para colocar em causa a integridade do componente, como é possível observar no intervalo de valores. Este tubo apresenta maior concentração de tensões no lado direito devido ao facto de estar constringido por uma ligação do tipo pino (Figura 104) que simula uma fixação por parafuso.

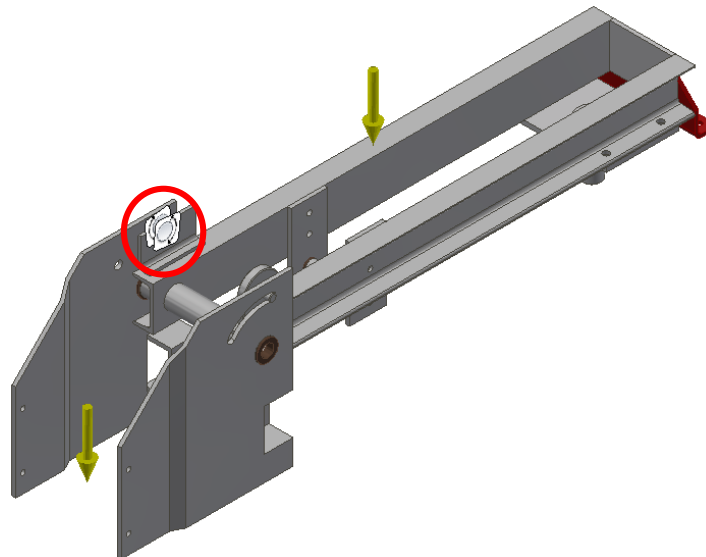


Figura 104 - Localização da fixação de posição das chapas por ligação aparafusada

Para os deslocamentos, o valor máximo obtido foi de 0,20 mm, localizado na chapa direita de acoplamento do trans-rupter (Figura 105).

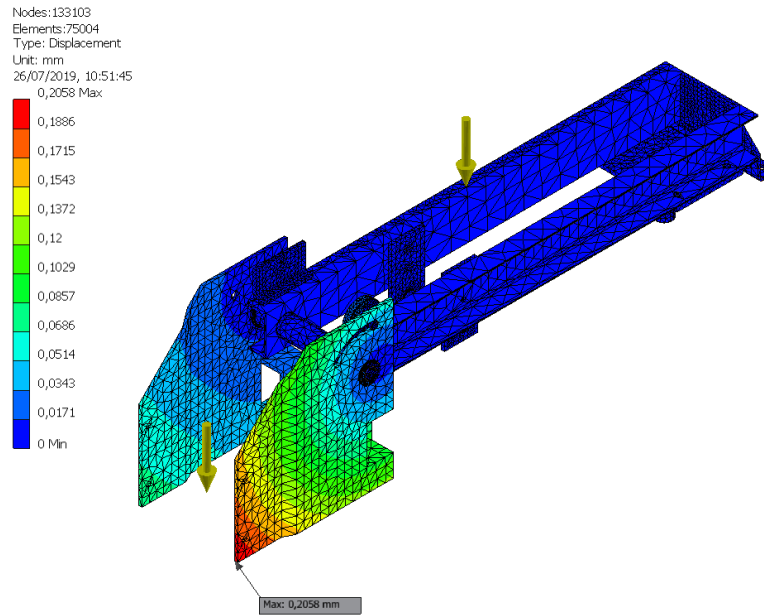


Figura 105- Valor máximo e localização dos deslocamentos

Este fenómeno ocorre devido ao facto de não existir uma fixação na chapa direita como ocorre na outra, daí a existência de maiores deslocamentos. Contudo estes deslocamentos são muito pequenos, devido à inércia e resistência à flexão deste tipo de perfis, não pondo em risco o funcionamento e finalidade da estrutura.

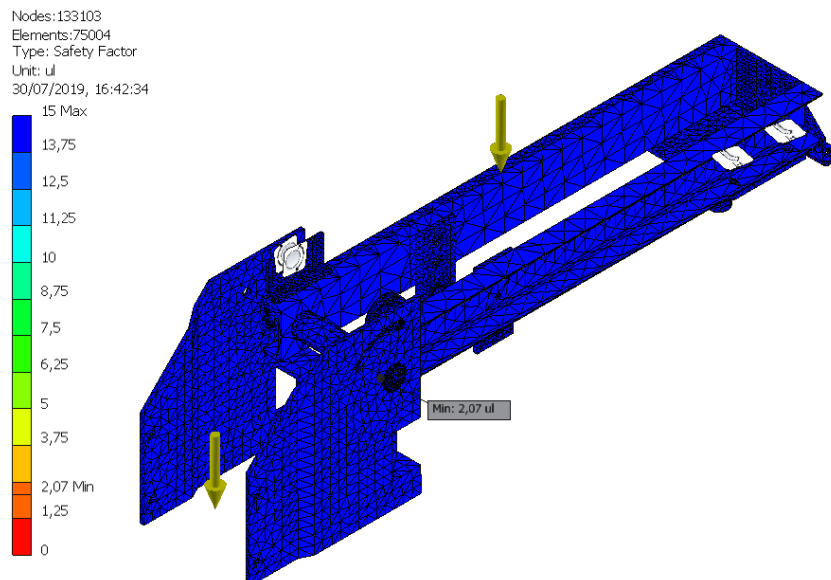


Figura 106- Coeficiente de segurança mínimo

Para o coeficiente de segurança, tendo como mínimo aceitável cerca de 1,5, foi obtido um valor de 2,07 (Figura 106) localizado no casquilho inferior das chapas de acoplamento do trans-rupter (Figura 107). Deste modo verifica-se que existe espaço para possíveis otimizações.

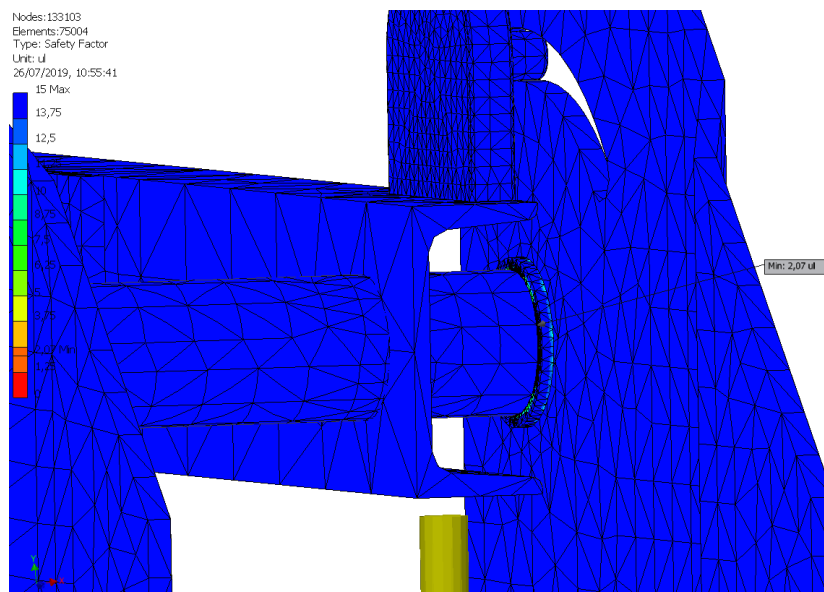


Figura 107-Localização do coeficiente de segurança mínimo

Estes valores são considerados como credíveis pois apresentam uma convergência de cerca de 5%, cumprindo o requisito da Autodesk (Figura 108). Em termos de propriedades físicas o braço possui uma massa de 90,6kg (Figura 109).

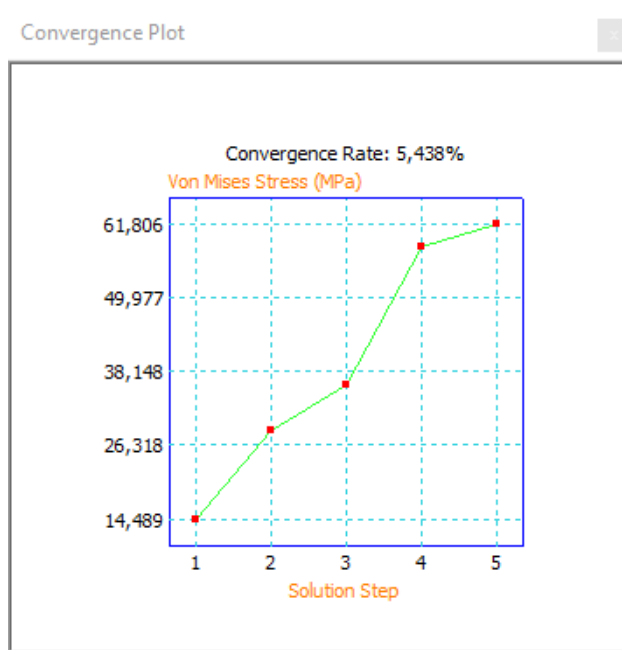


Figura 108- Rácio de convergência para a tensão de von Mises

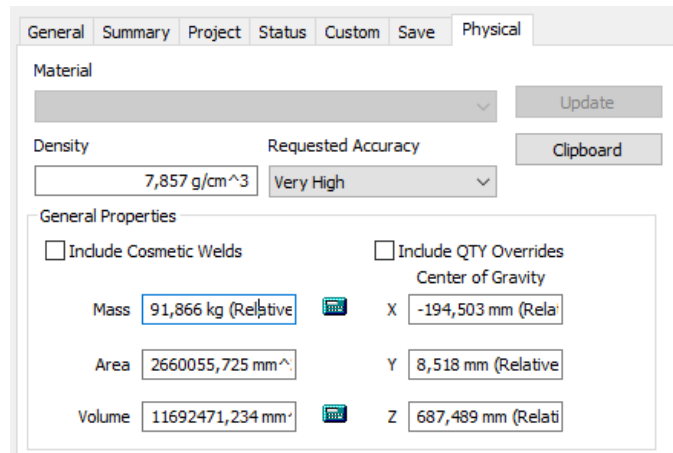


Figura 109- Propriedades físicas do braço da estrutura

Após estas primeiras análises, de maneira a reduzir a massa da estrutura foi realizada uma segunda análise com uma redução de perfis de UPN120 para UPN80. Esta alteração levou a que houvesse uma modificação na geometria das chapas de acoplamento do trans-rupter, deixando de existir a quinagem presente para acomodar o trans-rupter (Figura 110).

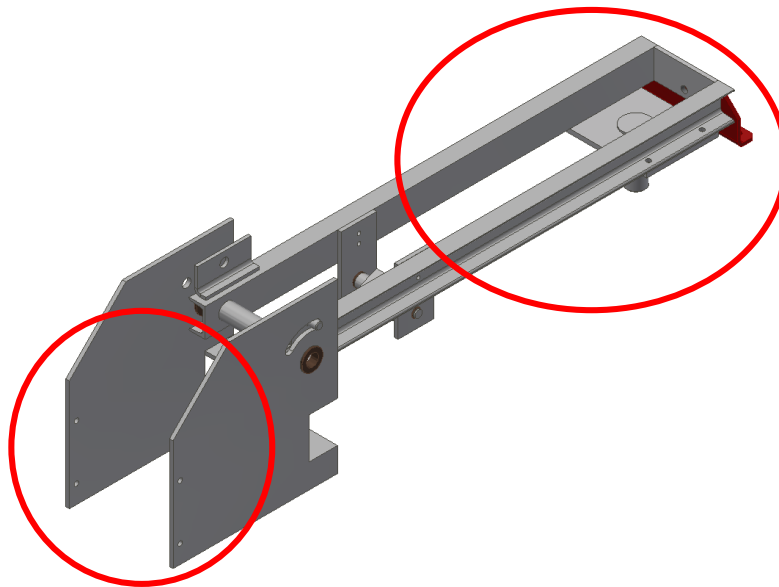


Figura 110- Braço lateral alterado

Na realização da simulação, foram utilizadas as mesmas condições de análise anterior. Nesta análise foi criada uma malha para a otimização do braço de 43822 elementos (Figura 111) e foi obtida uma convergência de 1,9% (Figura 112).

Nodes:149289
Elements:84831

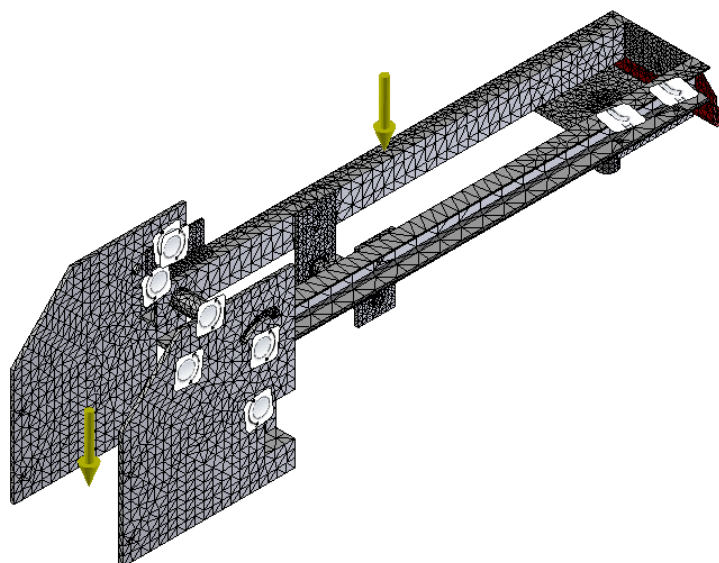


Figura 111- Braço otimizado com malha

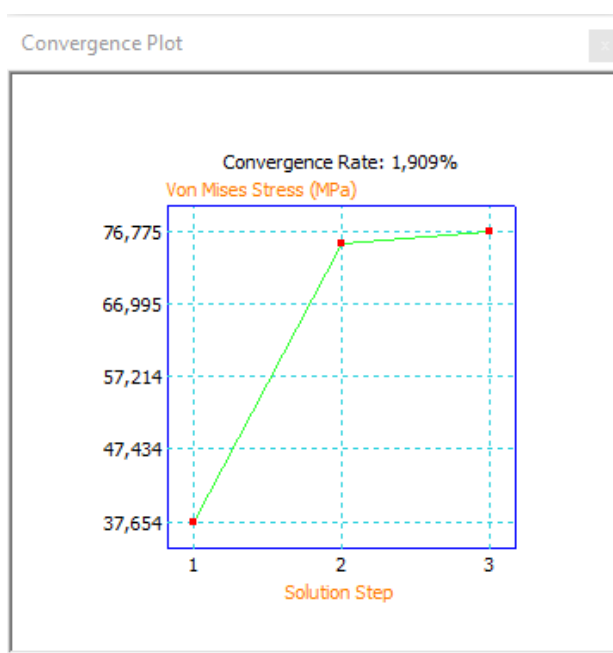


Figura 112- Convergência para a simulação do braço da estrutura

No que toca às tensões equivalentes de von Mises, o valor máximo atingido foi de 76,77 MPa (Figura 113). Este encontra-se localizada no casquilho referido na análise anterior (Figura 114).

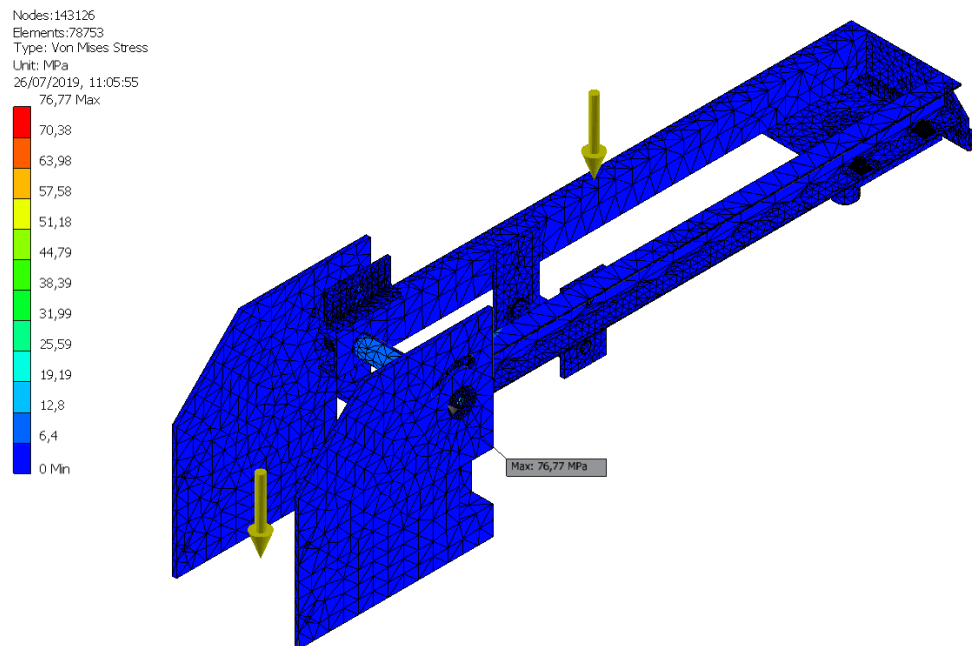


Figura 113- Simulação MEF braço lateral

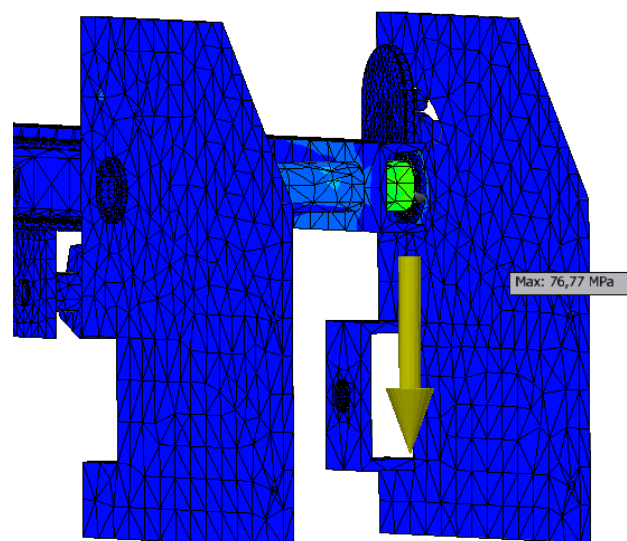


Figura 114- Localização da tensão máxima de von Mises

É possível observar que, do lado direito, existe uma maior concentração de tensões devido ao facto de no lado esquerdo existir uma fixação de posição das chapas. Esta fixação existe de maneira a que não haja deslocamento das chapas da posição de serviço ou trânsito, que leva a que os deslocamentos da chapa esquerda sejam muito inferiores aos deslocamentos presentes na chapa da direita (Figura 115).

Na restante estrutura do braço é possível verificar que não existem tensões significativas para pôr em causa o funcionamento da estrutura.

Em relação aos deslocamentos, o valor máximo obtido é de cerca 0,50 mm (Figura 115). Este valor encontra-se na chapa direita de acoplamento do trans-rupter.

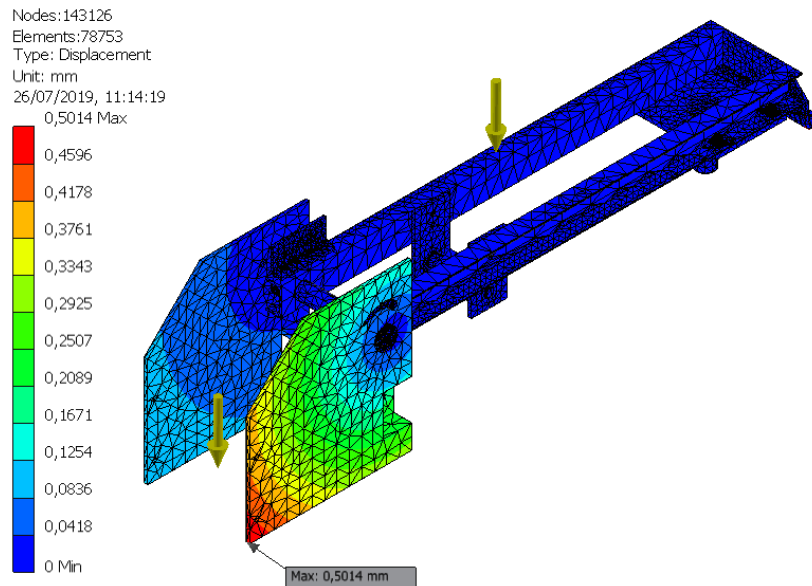


Figura 115- Deslocamentos presentes no braço lateral em trânsito

O fator de segurança para este projeto seria considerado aceitável se tivesse um valor mínimo de 1,5, como já foi mencionado anteriormente. Segundo a análise realizada, o fator de segurança mínimo é de 1,67 (Figura 116). Este valor encontra-se dentro do intervalo estipulado sendo considerado por isso como aceitável. O valor crítico de coeficiente de segurança encontra-se localizado no casquilho onde existe a maior concentração da tensão de von Mises (Figura 117).

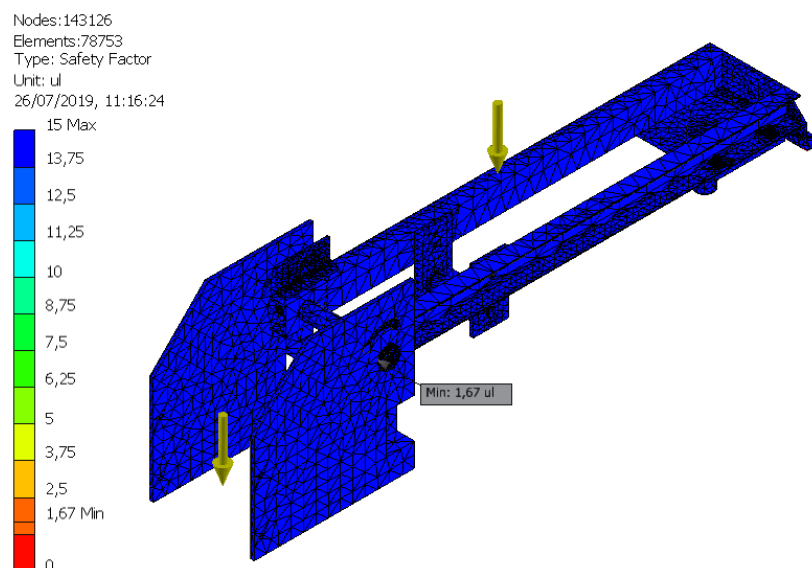


Figura 116- Coeficiente de segurança do braço

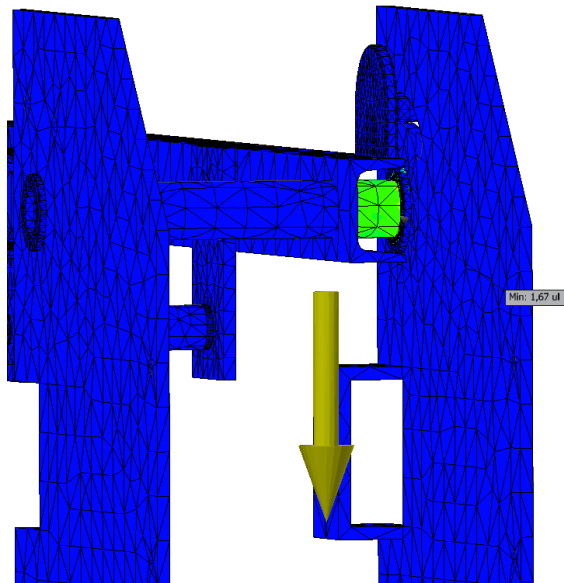


Figura 117- Localização do coeficiente de segurança mínimo

No que toca à massa, o braço com as otimizações apresenta um valor de cerca de 76,4 kg (Figura 118), apresentando uma redução em relação aos 90,6 kg da solução anterior (Figura 109).

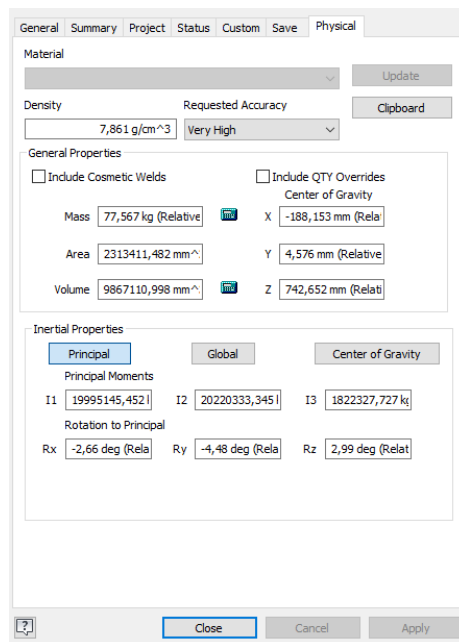


Figura 118- Propriedades físicas do braço lateral da estrutura

Assim sendo, é possível observar as diferenças nos valores obtidos antes e depois das alterações para os vários campos estudados em cada análise (Tabela 17).

Tabela 17- Tabela comparativa dos braços da estrutura para UPN120 e UPN80

	UPN120	UPN80
Tensão máxima de von Mises (MPa)	61,81	76,77
Deslocamento máximo (mm)	0,205	0,50
Coefficiente de segurança	2,07	1,67
Massa (kg)	90,6	76,4

Através da análise da Tabela 17 é possível observar que existe um aumento do valor máximo da tensão de von Mises do braço com UPN80 em relação ao braço com UPN120. Isto ocorre devido ao facto de, com a diminuição dos perfis UPN, existir uma diminuição da área da secção e do momento de inércia à flexão.

Como consequência do aumento do valor máximo de tensão de von Mises, o coeficiente de segurança do braço constituído por UPN80 diminui em relação ao braço constituído por UPN120. Uma vez que o componente onde existe a tensão máxima de von Mises é o mesmo para ambas as análises, pode-se dizer que o coeficiente de segurança, dado pela razão tensão de cedência do material/tensão máxima de von Mises, diminui com o aumento da tensão máxima que foi o que se veio a verificar.

Ainda é possível observar que o deslocamento máximo (Tabela 17) também sofreu um aumento no braço constituído por UPN80 em relação ao braço constituído por UPN120. Este aumento acontece maioritariamente devido ao momento de inércia do braço constituído por UPN120 ser superior ao momento de inércia do braço constituído por UPN80. Como o momento de inércia está associado à resistência que um corpo tem em sofrer deformações em torno de um dado eixo, a distribuição de massa em torno desse eixo irá ter influência no momento de inércia aumentando ou diminuindo o mesmo (Dicker Jr. et al. 2003, Hibbeler 2010).

3.5.4.2 Base de assentamento e pés da estrutura

De seguida, foi realizado o dimensionamento e verificação da integridade estrutural da base de assentamento (Figura 119) da estrutura de suporte dos trans-rupters.



Figura 119- Base de assentamento da estrutura

Esta base de assentamento tem como principais componentes dois perfis UPN120 (Figura 120) que contêm furações em ambos os banzós de forma a que seja possível conectar, por ligações aparafusadas, os sistemas de rotação dos braços laterais, a chapa de fixação do braço central e as chapas soldadas aos pilares da estrutura.

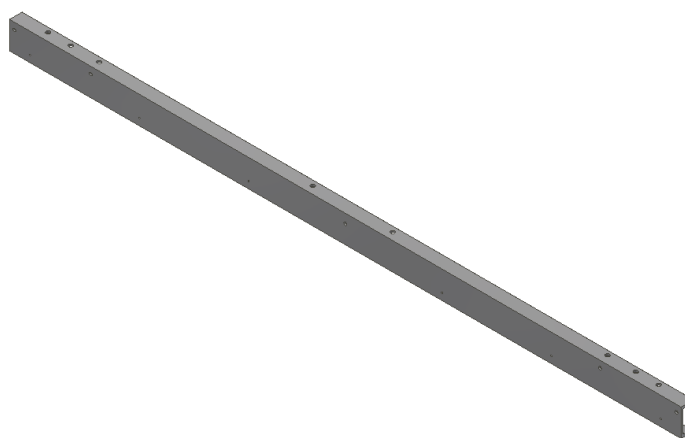


Figura 120- Perfil UPN120 da base de assentamento

Estes dois perfis contêm dois travamentos de perfil UPN120 (Figura 121), projetados de maneira a ser possível fazer a conexão entre os dois perfis. Estes dois travamentos são soldados a ambos os perfis.

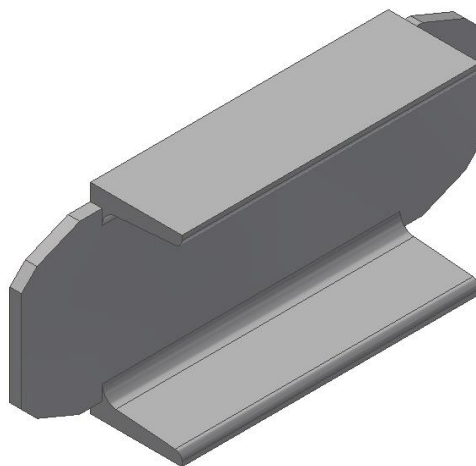


Figura 121- Travamento da base de assentamento

Os sistemas que permitem a rotação dos braços (Figura 122) encontram-se em ambas as extremidades dos perfis. Este sistema é composto por duas chapas de 12 mm, um perfil tubular onde irá ser colocado o braço lateral e um casquilho que evita o contacto entre aço do tubo e veio do braço, evitando o desgaste resultante do contacto aço com aço das superfícies.

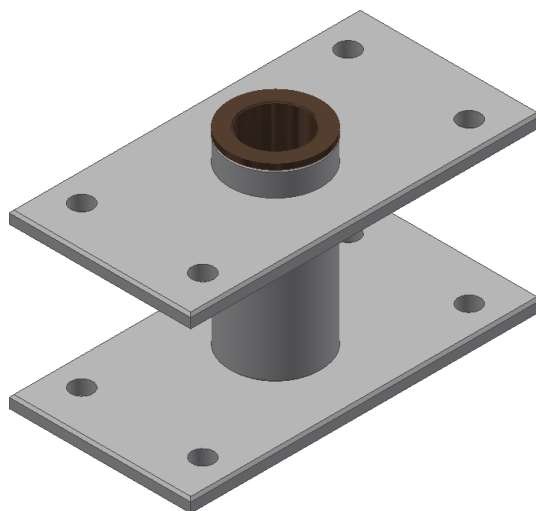


Figura 122- Sistema de rotação dos braços laterais

As furações presentes nestas chapas (Figura 123) obedecem às imposições dimensionais do Eurocódigo 3 parte 8 e norma EN 4014 para a aplicação de um parafuso M16.

$$e_1 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$p_1 = 2,2 * 18 = 39,6 \text{ mm}$$

$$p_2 = 2,4 * 18 = 43,2 \text{ mm}$$

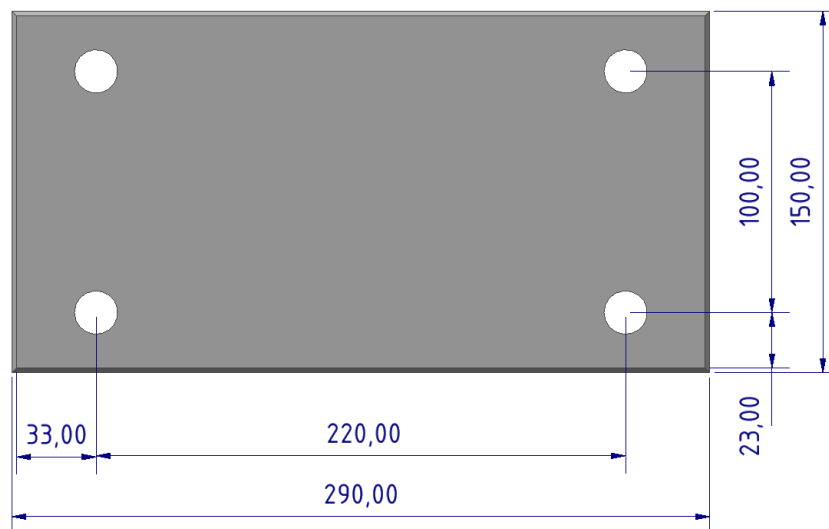


Figura 123- Distâncias das furações às extremidades e entre eixos

Ainda na base de assentamento (Figura 124) existem duas cantoneiras 60x60x8 mm³ soldadas na parte traseira que servem para a fixação, por ligação aparafusada, dos braços laterais quando estes se encontram na posição de trânsito.

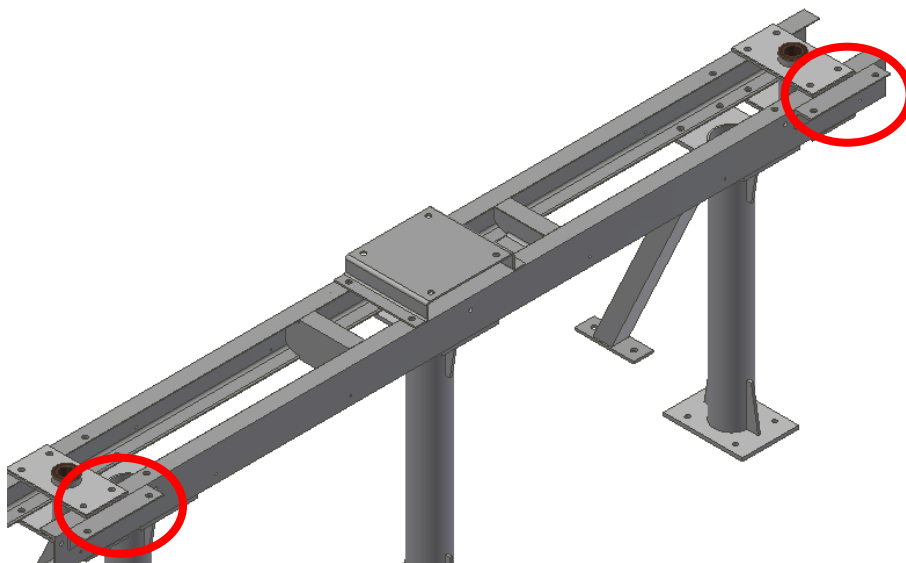


Figura 124- Cantoneiras da base de assentamento

Mais uma vez as furações (Figura 125) estão conforme as equações do Eurocódigo 3 parte 1-8 (Tabela 15) e norma EN 4014 (Tabela 14):

$$e_1 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$p_1 = 2,2 * 18 = 39,6 \text{ mm}$$

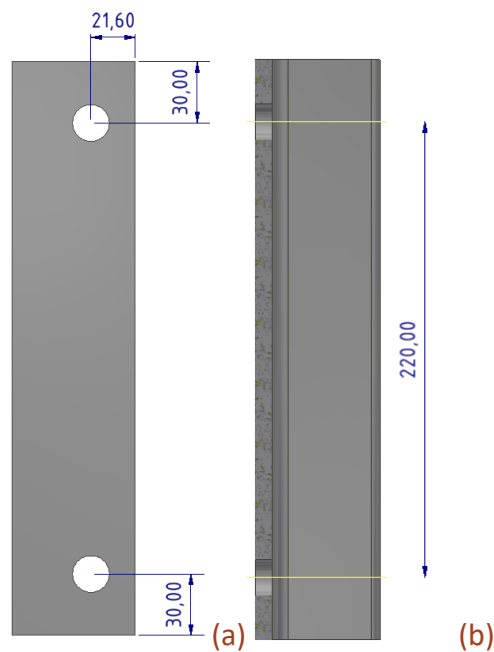


Figura 125- Distâncias das furações às extremidades (a) e entre eixos (b)

Também se observa que a meio da base de assentamento existe uma chapa quinada (Figura 126) que tem como finalidade criar altura de maneira a que o braço central fique com a mesma altura dos braços laterais.

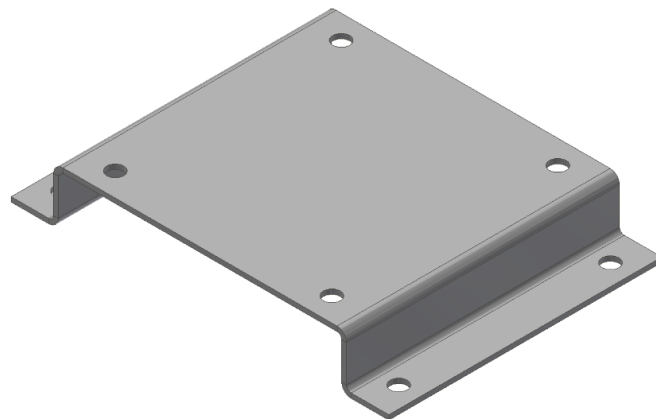


Figura 126- Chapa de assentamento do braço central

Para os pés da base de assentamento (Figura 127) foi escolhido um sistema constituído duas chapas soldadas a um perfil tubular. De notar que existe ainda uma cantoneira com um cutelo, ambos soldados ao perfil tubular para acomodar uns suportes dos pés. São ainda utilizados uns cutelos de maneira a criar um maior reforço nos pés.



Figura 127- Pé da estrutura

Ambas as chapas da estrutura estão dimensionalmente conforme o Eurocódigo 3 parte 1-8 (Tabela 15) e norma EN 4014 (Tabela 14) para furos de diâmetro 18 mm (Figura 128) e 16 mm (Figura 129).

$$e_1 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$p_1 = 2,2 * 18 = 39,6 \text{ mm}$$

$$p_2 = 2,4 * 18 = 43,2 \text{ mm}$$

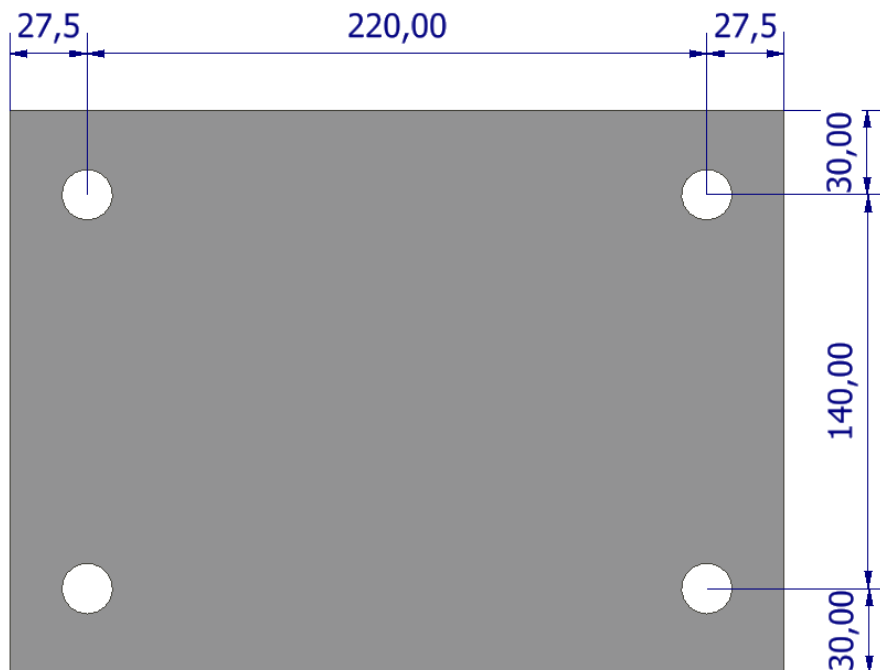


Figura 128- Dimensões das furações às extremidades e entre eixos dos furos para a chapa superior

$$e_1 = 1,2 * 16 = 19,2 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1,2 * 16 = 19,2 \text{ mm}$$

$$p_1 = 2,2 * 16 = 35,2 \text{ mm}$$

$$p_2 = 2,4 * 16 = 38,4 \text{ mm}$$

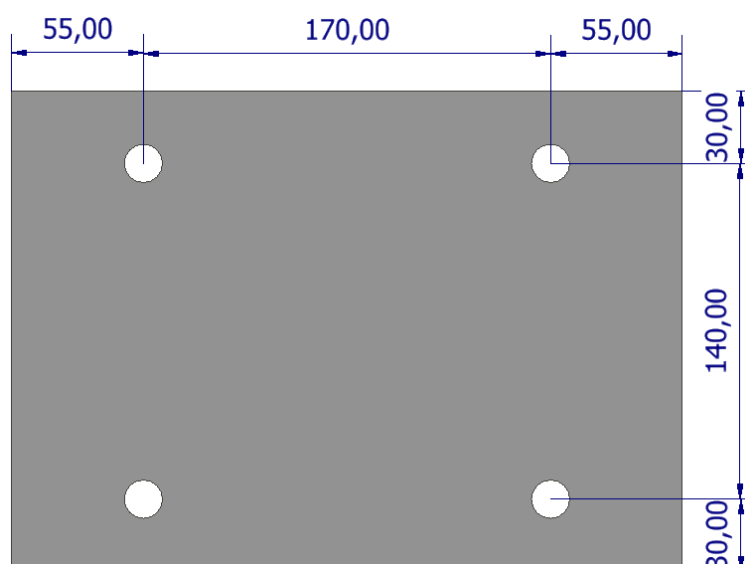


Figura 129- Dimensões das furações às extremidades e entre eixos dos furos para a chapa inferior

Para os suportes dos pés (Figura 130) foram utilizadas cantoneiras de $60 \times 60 \times 8 \text{ mm}^3$ soldadas a duas chapas de 8 mm para ligação às cantoneiras dos pés e ao chão.

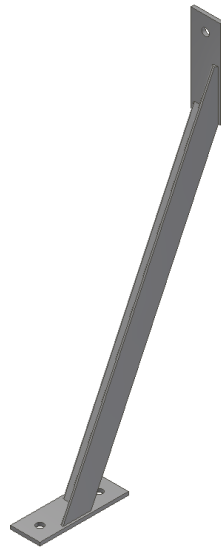


Figura 130- Suporte dos pés

As furações estão conforme o Eurocódigo 3 parte 8 (Tabela 15) e norma EN 4014 (Tabela 14) para acomodar parafusos M16.

$$e_1 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$e_2 = 1,2 * 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$p_1 = 2,2 * 18 = 39,6 \text{ mm}$$

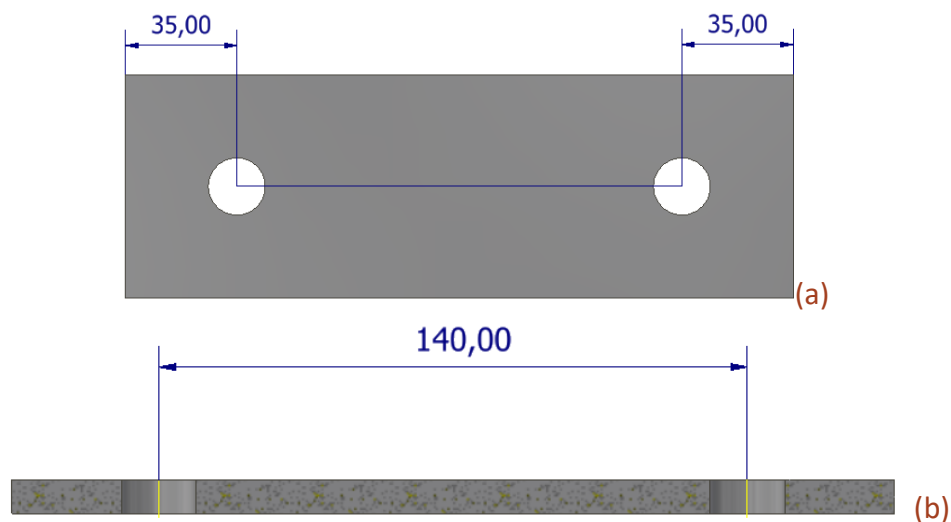


Figura 131- Distâncias das furações às extremidades (a) e entre eixos (b)

Após a definição dos componentes e furações foram definidas as condições fronteira para a análise da base de assentamento e respetivos pés da estrutura pelo MEF.

Assim sendo estão aplicados três momentos, um em cada braço de valor de 161000 N.mm (Figura 132). As restrições aplicadas são do tipo *Fixed* e estão localizadas nas chapas dos pés da base de assentamento e nos suportes dos pés (Figura 133).

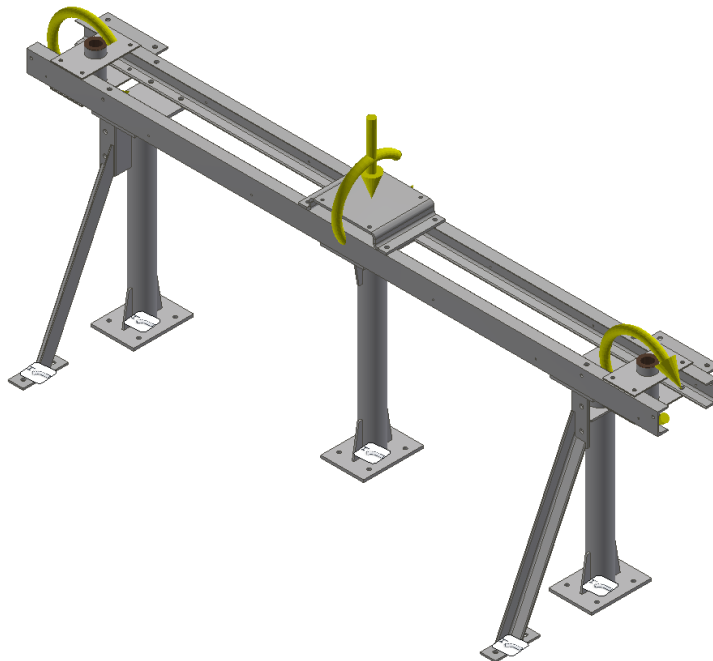


Figura 132-Base de assentamento

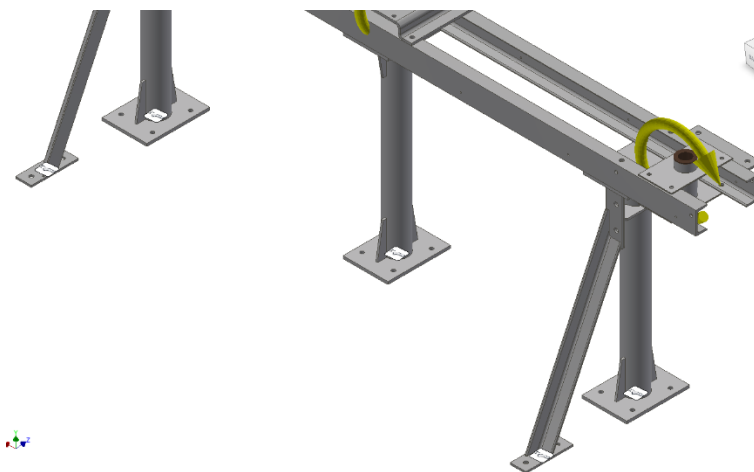


Figura 133- Localização das restrições *Fixed*

De seguida foram feitas várias iterações de maneira a conseguir uma malha com um número de elementos razoável, obtendo cerca de 71394 elementos (Figura 134). Assim sendo, foi realizada a simulação para a posição em serviço e para a posição em trânsito.

Em primeiro lugar, foram realizadas simulações para a posição em serviço. Para as tensões equivalentes de von Mises, foi obtido um valor máximo de 57,73 MPa (Figura 132) localizado na quinagem da base de suporte do braço central (Figura 134).

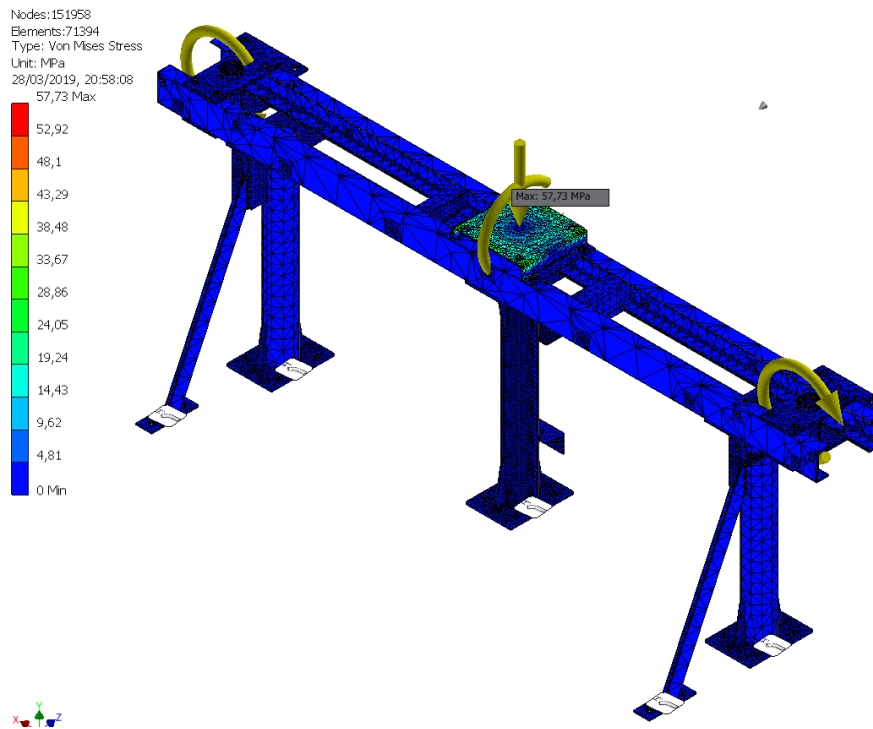


Figura 134-Tensões equivalentes de von Mises na base de assentamento

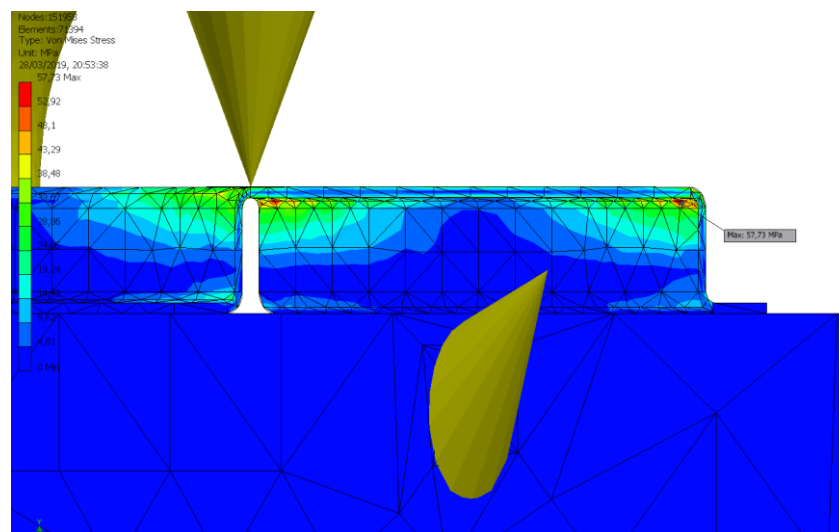


Figura 135- Localização da tensão máxima de von Mises

Esta concentração de tensões equivalente de von Mises (Figura 135) ocorre devido ao facto de ser uma zona de variação de geometria brusca e não apresentar nenhum tipo de travamento na zona central da chapa. Esta concentração de tensões não tem um

valor suficientemente alto para causar rotura no material considerado, que foi o aço S275JR.

No que toca aos deslocamentos, o valor máximo é de 0,33 mm, que é um deslocamento muito baixo não tendo qualquer tipo de influência no funcionamento da estrutura nem equipamento (Figura 136). Este encontra-se na chapa de suporte do braço central (Figura 137), o que seria de esperar visto que a chapa de fixação do braço central se encontra fixado por uma chapa quinada sem qualquer travamento.

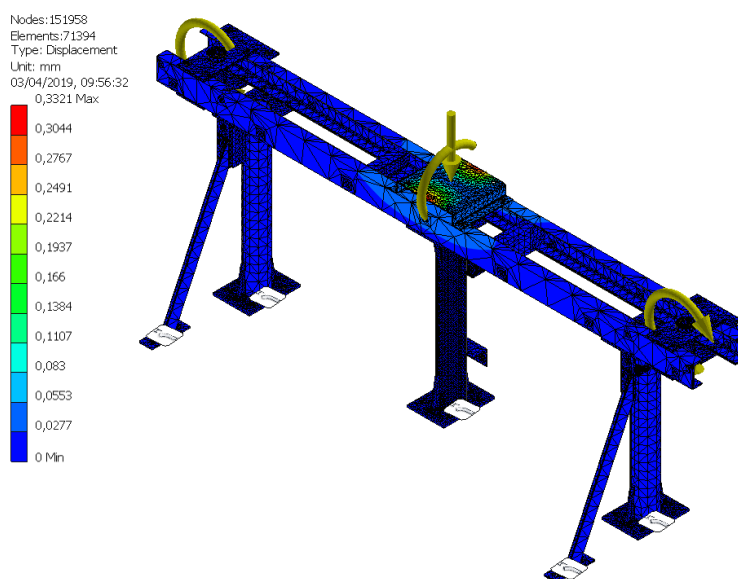


Figura 136-Deslocamentos máximos

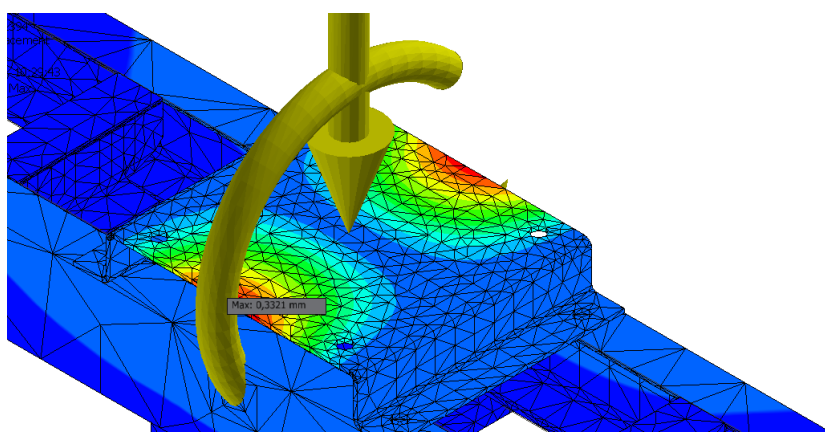


Figura 137- Localização dos deslocamentos máximos

É expectável que esta zona esteja sujeita a este tipo de deslocamento devido ao momento aplicado, e direção do mesmo, na chapa.

Em termos de coeficiente de segurança, este atinge um valor mínimo de 4,76 (Figura 138) e encontra-se na quinagem da chapa de suporte do braço central (Figura 139).

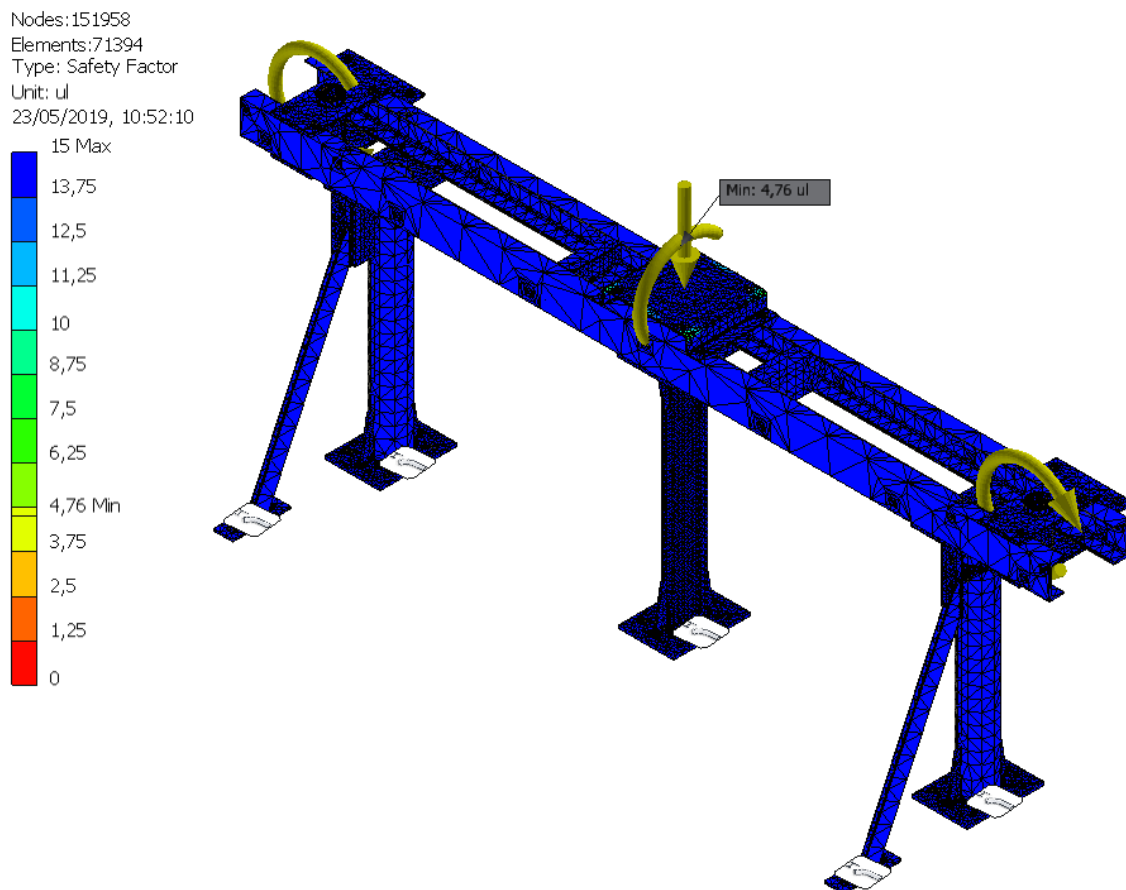


Figura 138- Análise do coeficiente de segurança mínimo

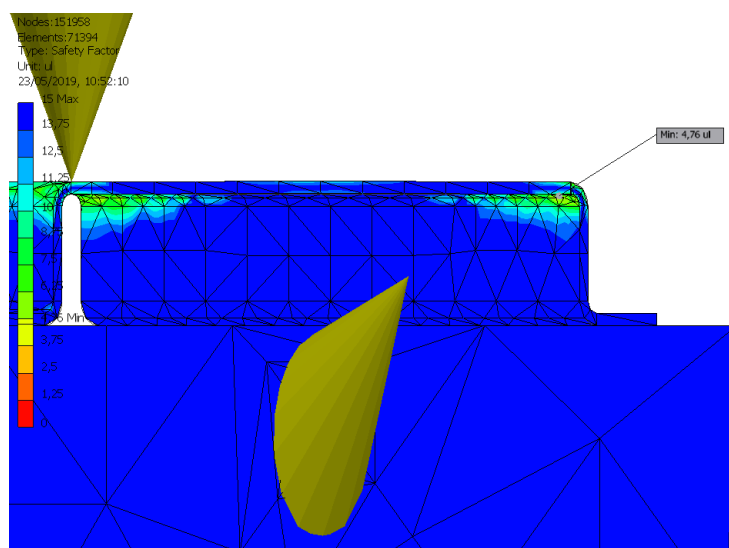


Figura 139- Localização ampliada do coeficiente de segurança mínimo

De seguida, foi realizada a simulação em que a estrutura se encontra na posição de trânsito (Figura 140), ou seja, existe uma rotação de 90° dos braços da estrutura de maneira a que estes estejam “fechados”.

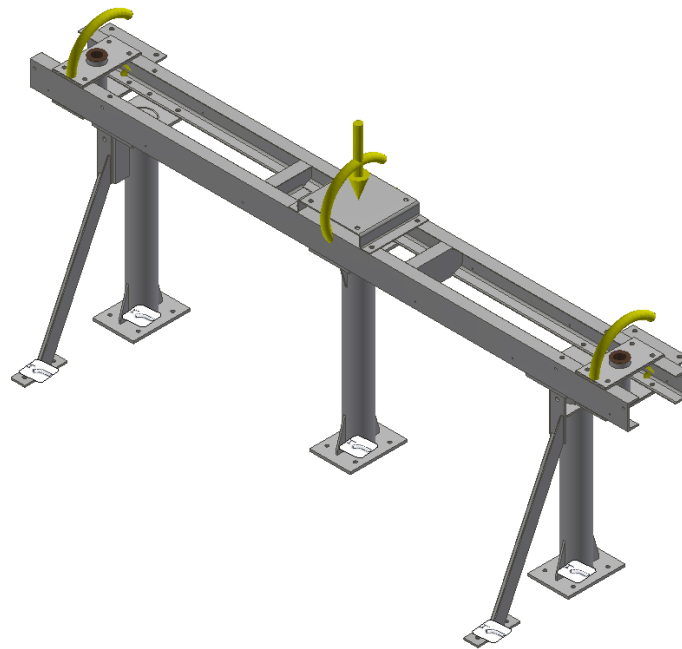


Figura 140- Momentos aplicados para a situação em trânsito

Na observação das tensões máximas de von Mises, o valor máximo atingido foi de 57,6 MPa (Figura 141).

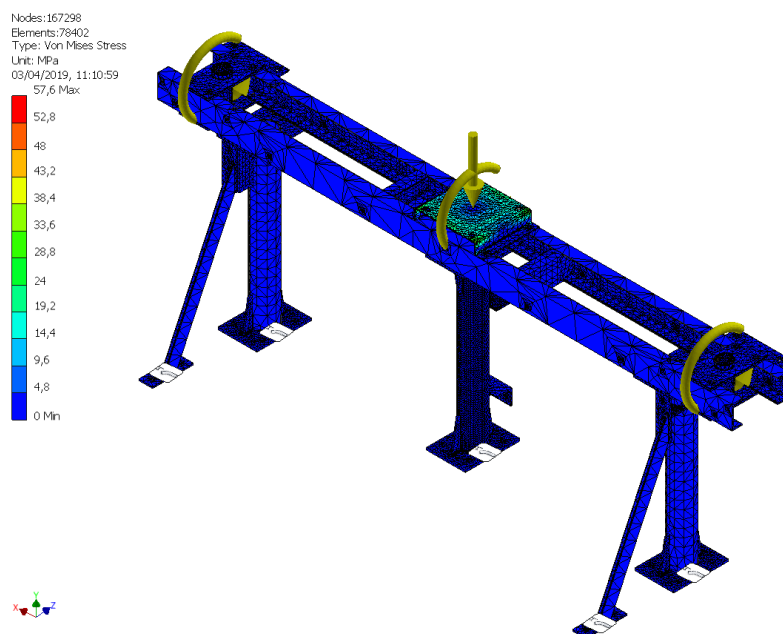


Figura 141-Tensões máximas de von Mises

Tal como na situação em que a estrutura se encontra na posição de serviço, a tensão máxima está localizada na quinagem da chapa de suporte do braço central (Figura 142), pelas mesmas razões já mencionadas.

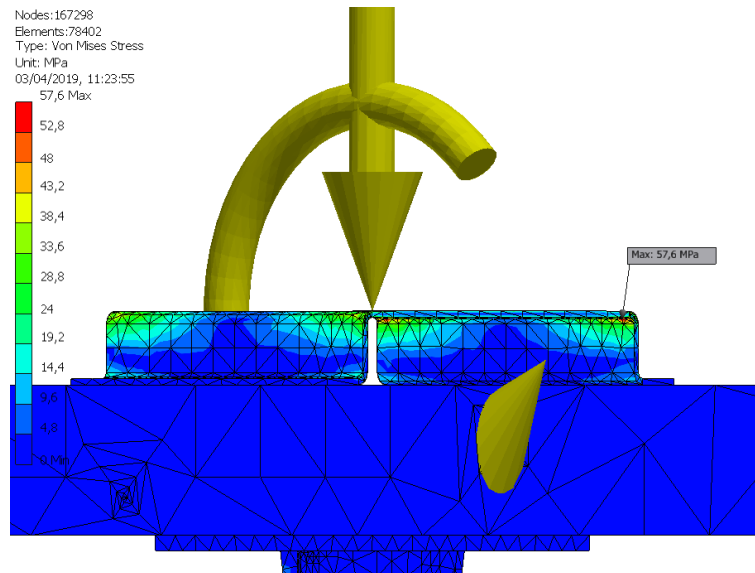


Figura 142-Localização da tensão máxima de von Mises

Os deslocamentos atingem um valor máximo de 0,33 mm presente na chapa de suporte do braço central (Figura 143). De notar que este deslocamento máximo é igual ao deslocamento presente na estrutura quando está em serviço, tanto em valor como em localização (Figura 144).

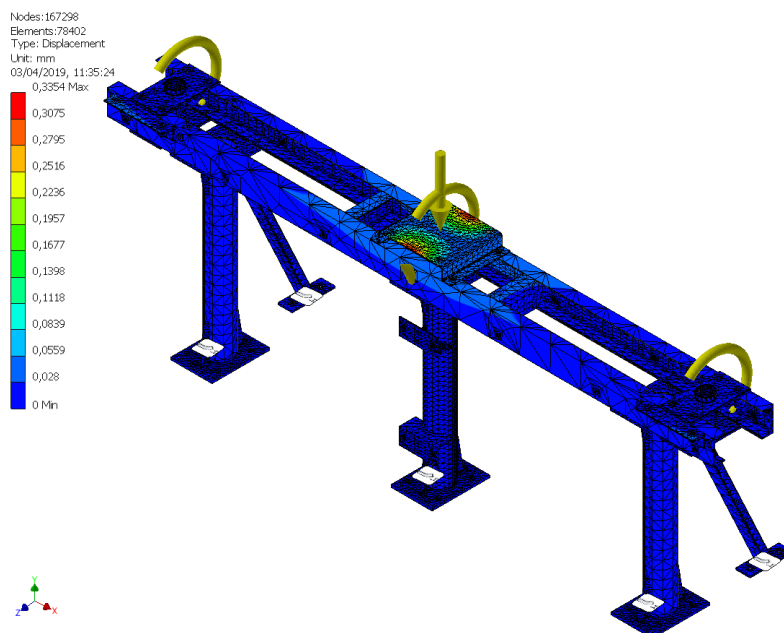


Figura 143-Deslocamentos máximos em trânsito

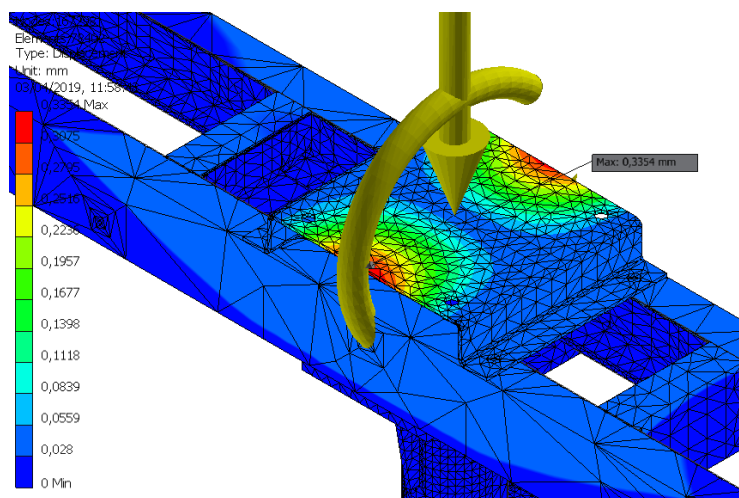


Figura 144-Localização do deslocamento máximo

Em termos de coeficiente de segurança o valor volta a ser de 4,77 (Figura 145), como na posição de serviço. Este valor mostra que existe espaço para otimizações e que a estrutura se encontra sobredimensionada, visto que o coeficiente de segurança mínimo requerido é de 1,5.

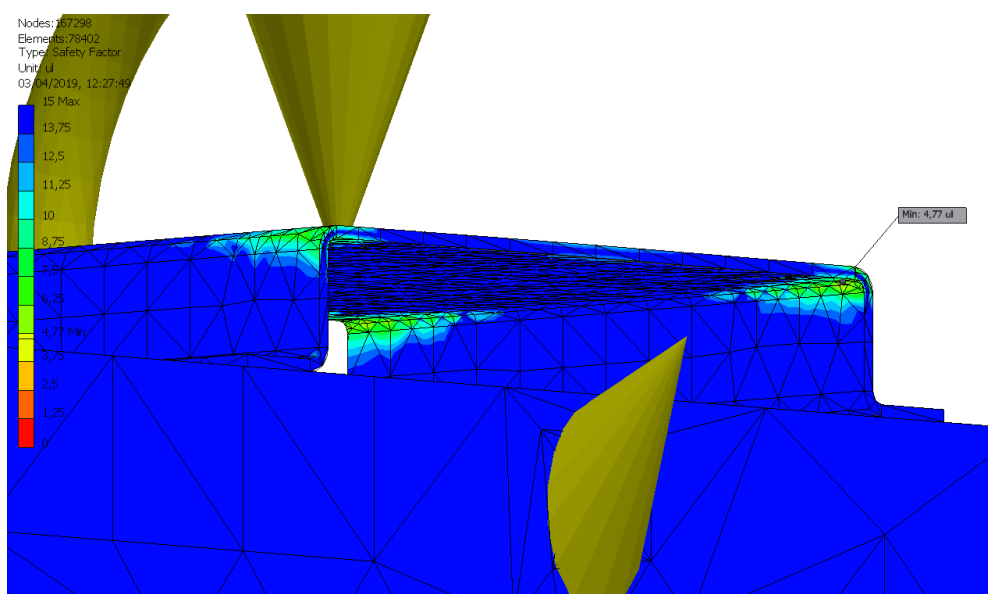


Figura 145-Valor mínimo e localização do coeficiente de segurança

A massa da base de assentamento para a análise com a constituição por UPN120 é de cerca de 210,5 kg (Figura 146).

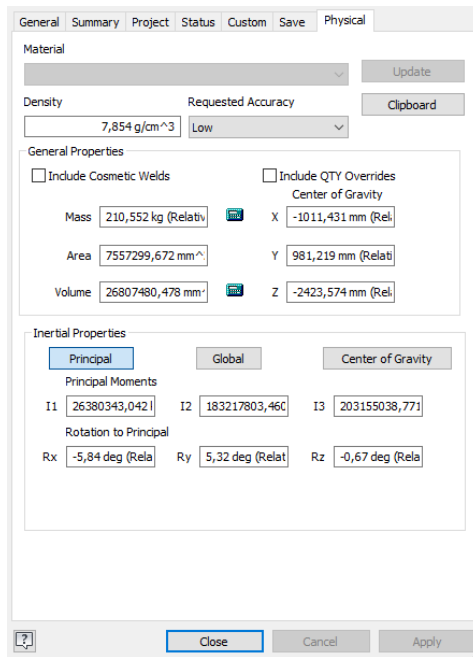


Figura 146- Propriedades físicas da base de assentamento

Desta forma, foram realizadas otimizações à estrutura de maneira a reduzir a sua massa e ajustar o coeficiente de segurança para um valor razoável (Figura 147). Para tal, uma das alterações principais foi o facto de os perfis da base de assentamento passarem de UPN120 para UPN100. As colunas dos pés da base de assentamento tiveram uma redução para um perfil tubular de diâmetro 100 mm e espessura 4 mm.

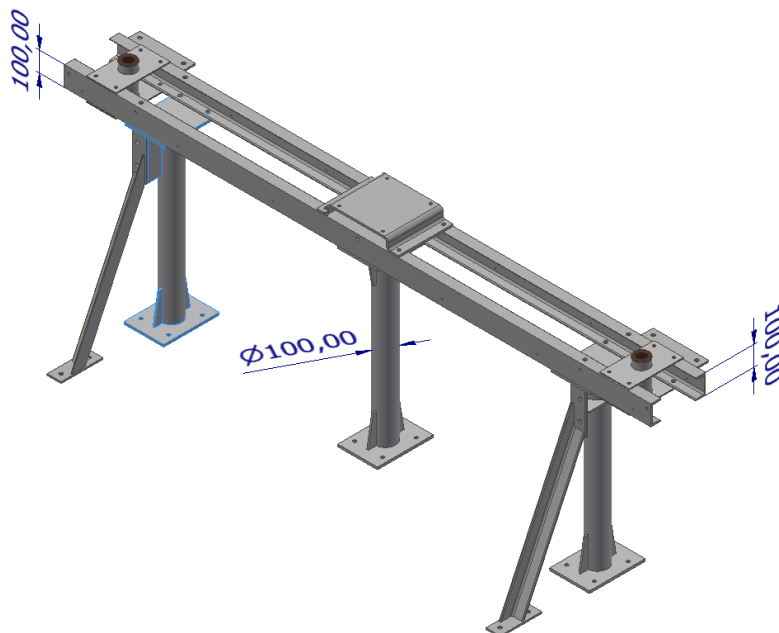


Figura 147- Estrutura base de assentamento otimizada

Foram então realizadas as simulações nas mesmas condições que as anteriores tanto para a posição em serviço como para a posição em trânsito. Deste modo, foi obtida uma malha de 84348 elementos (Figura 148) para o modelo em causa.

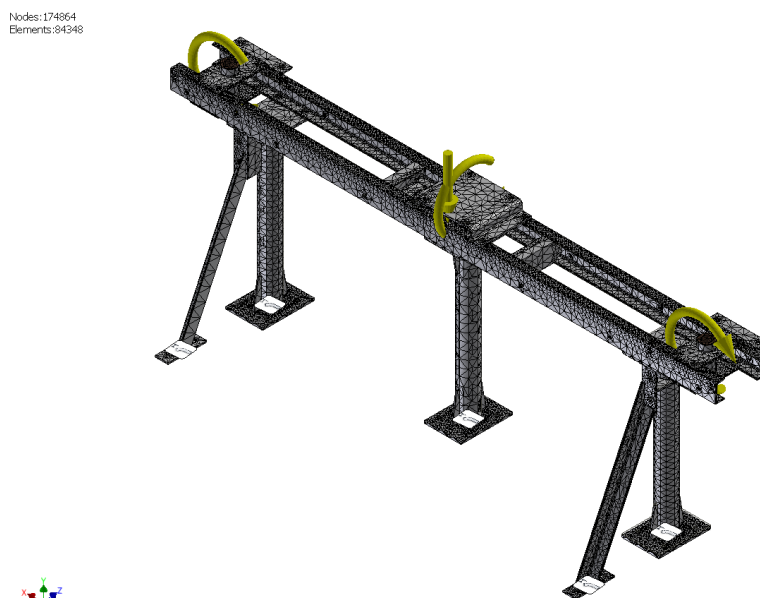


Figura 148- Modelo da base de assentamento otimizada com malha criada

Para a posição de serviço, o valor máximo da tensão de von Mises obtido é de 131,5 MPa (Figura 149). Este continua localizado na quinagem da chapa de suporte do braço central devido ao facto de a geometria curva ser mais suscetível à acumulação de tensões (Figura 150).

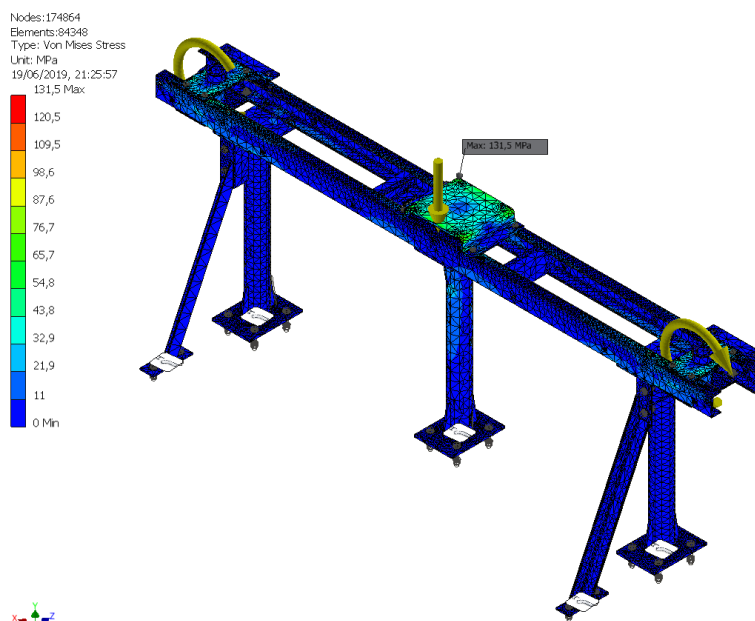


Figura 149-Tensão máxima de von Mises para a posição em serviço

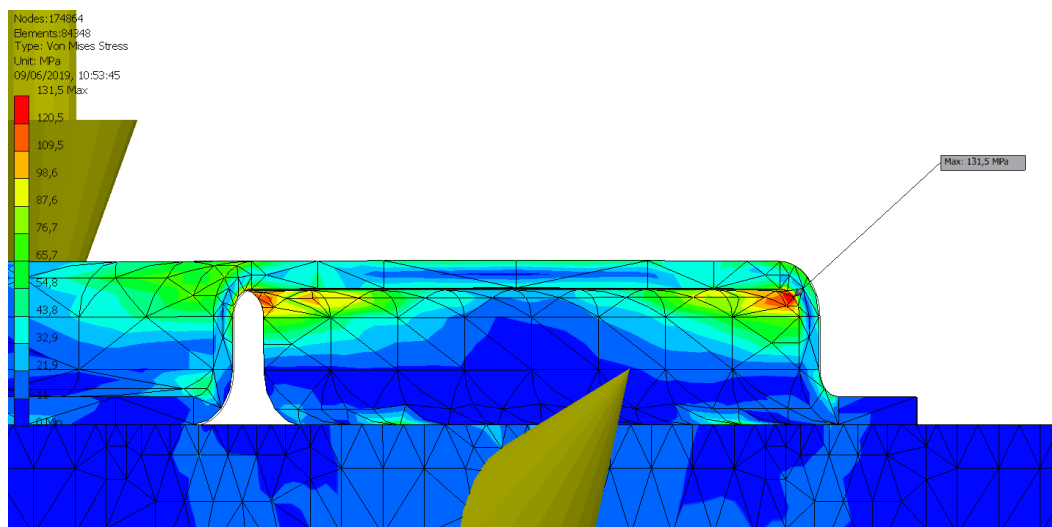


Figura 150-Localização da tensão máxima de von Mises

Em relação aos deslocamentos, estes atingem um valor máximo de cerca de 0,93 mm (Figura 151) na chapa de fixação do braço central (Figura 152).

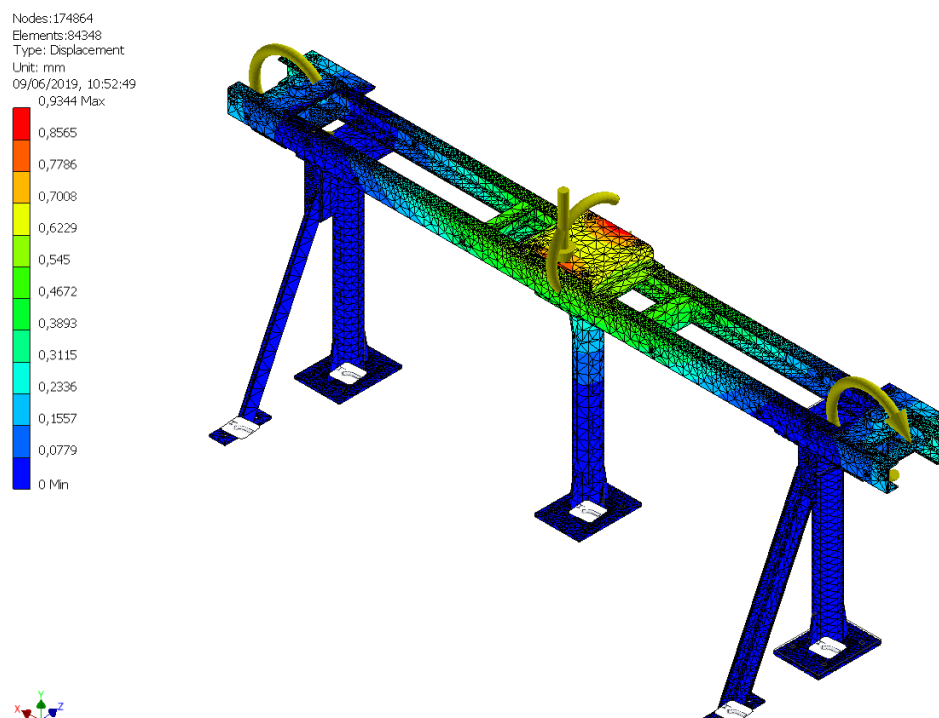


Figura 151-Deslocamentos máximos em serviço

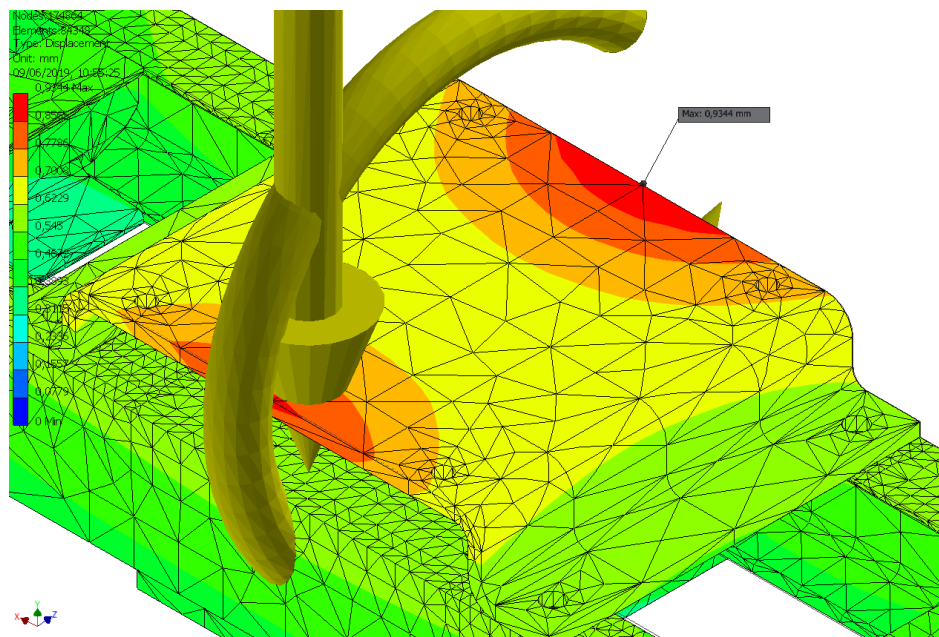


Figura 152- Localização ampliada do deslocamento máximo em serviço

Para o coeficiente de segurança, este atinge um valor mínimo de 2,09 (Figura 153) que se encontra localizado na quinagem da chapa da base do braço central (Figura 154).

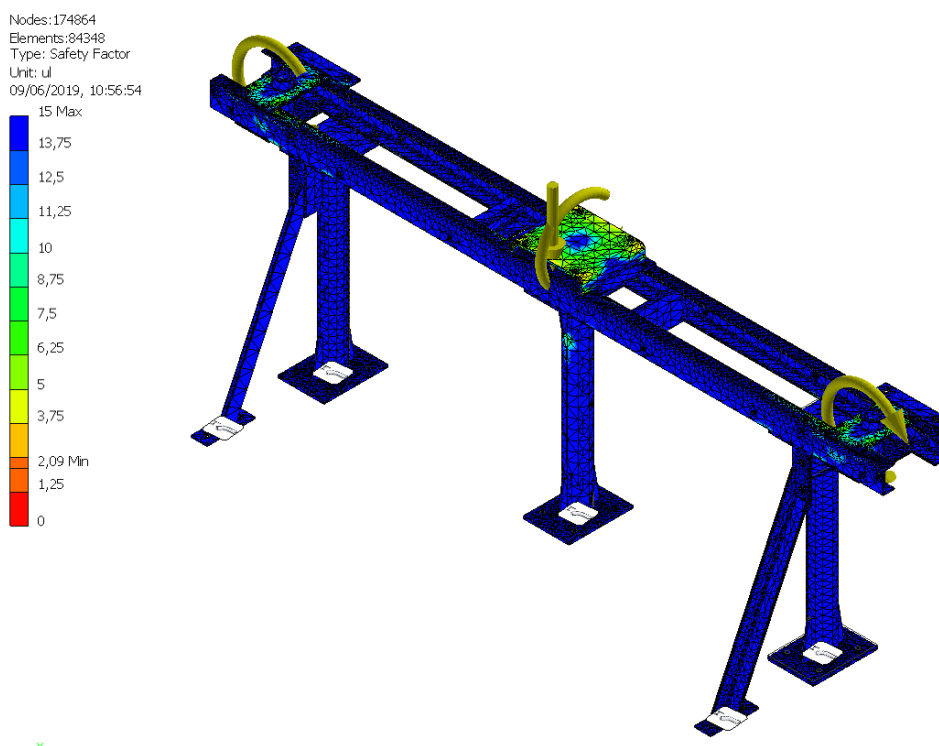


Figura 153- Coeficiente de segurança mínimo para a posição em serviço

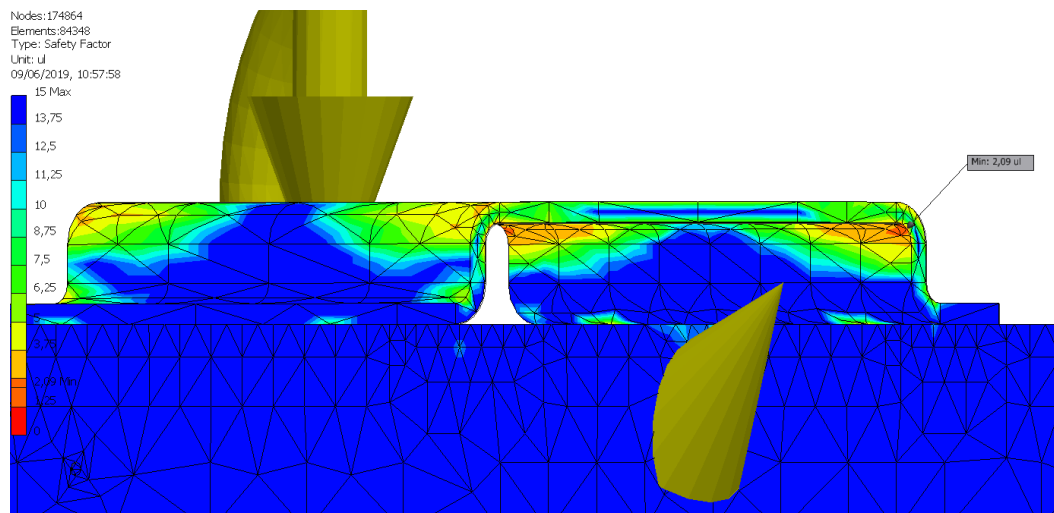


Figura 154- Localização ampliada do coeficiente de segurança mínimo em serviço

Para o caso da posição em trânsito, os momentos laterais irão mudar a direção passando então a serem paralelos ao momento central (Figura 155). Para este caso foi obtida uma malha com 77582 elementos (Figura 156).

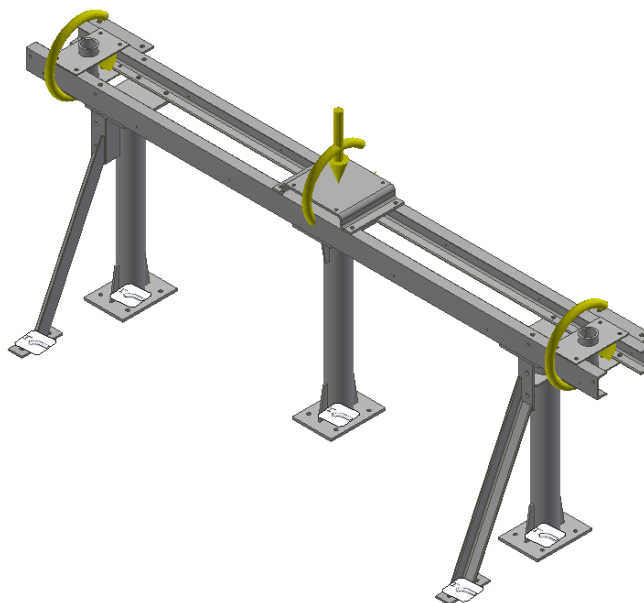


Figura 155- Aplicação dos momentos fletores para a posição de trânsito

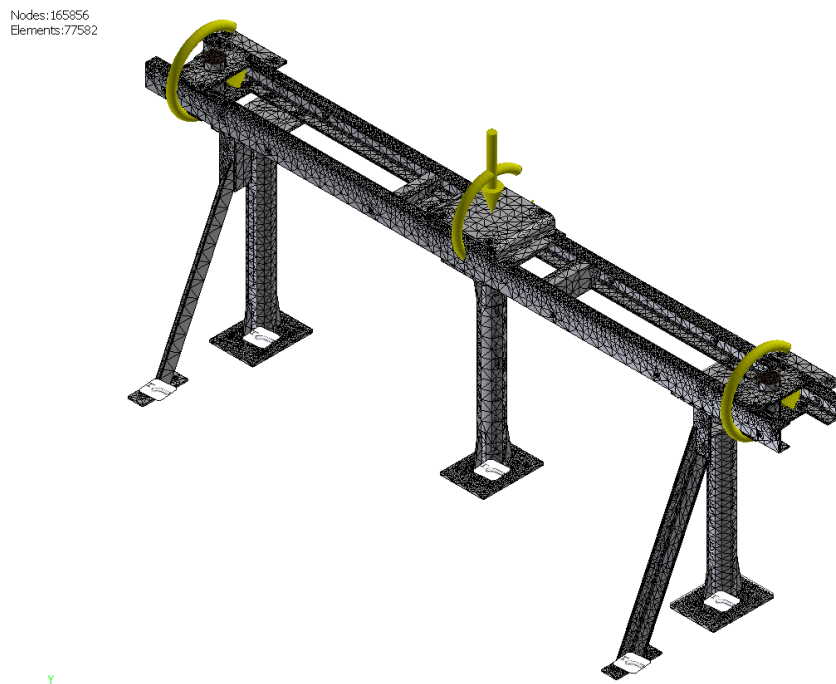


Figura 156- Modelo da base de assentamento otimiza em trânsito com malha criada

Na análise das tensões equivalentes de von Mises o valor máximo obtido foi de 144,7 MPa (Figura 157) e encontra-se localizado na quinagem da chapa de base do braço central (Figura 158).

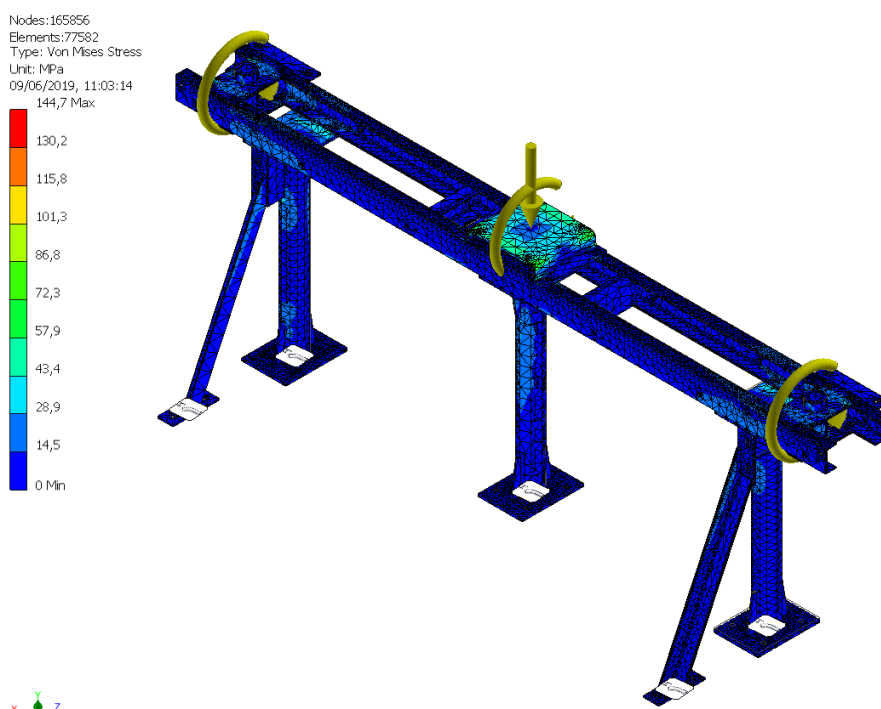


Figura 157- Análise das tensões equivalentes de von Mises para a posição de trânsito

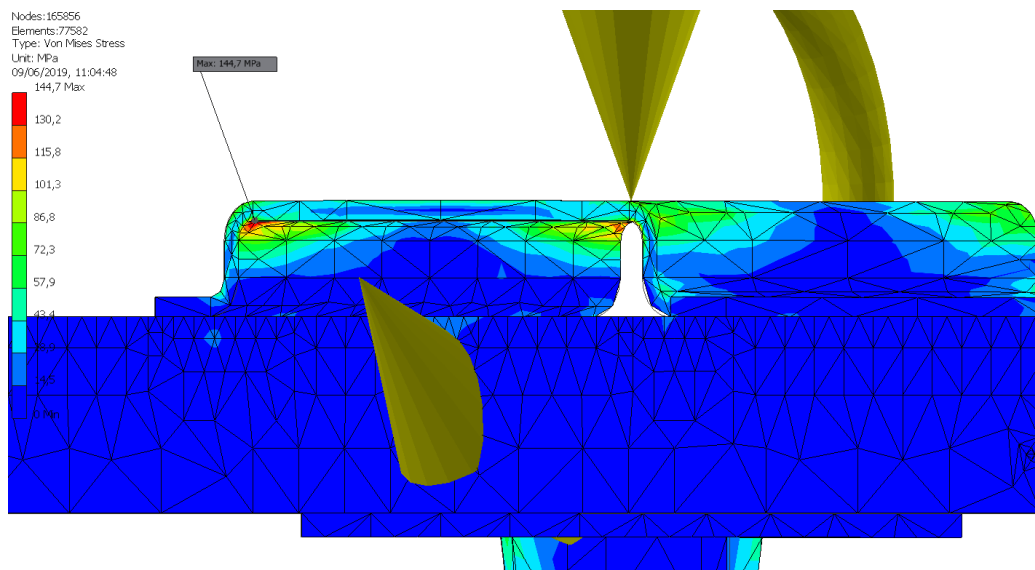


Figura 158- Localização ampliada da tensão máxima de von Mises

Em termos de deslocamentos, o valor máximo obtido da análise foi de 0,87 mm (Figura 159) e encontra-se localizado na chapa de fixação do braço central à base de assentamento (Figura 160).

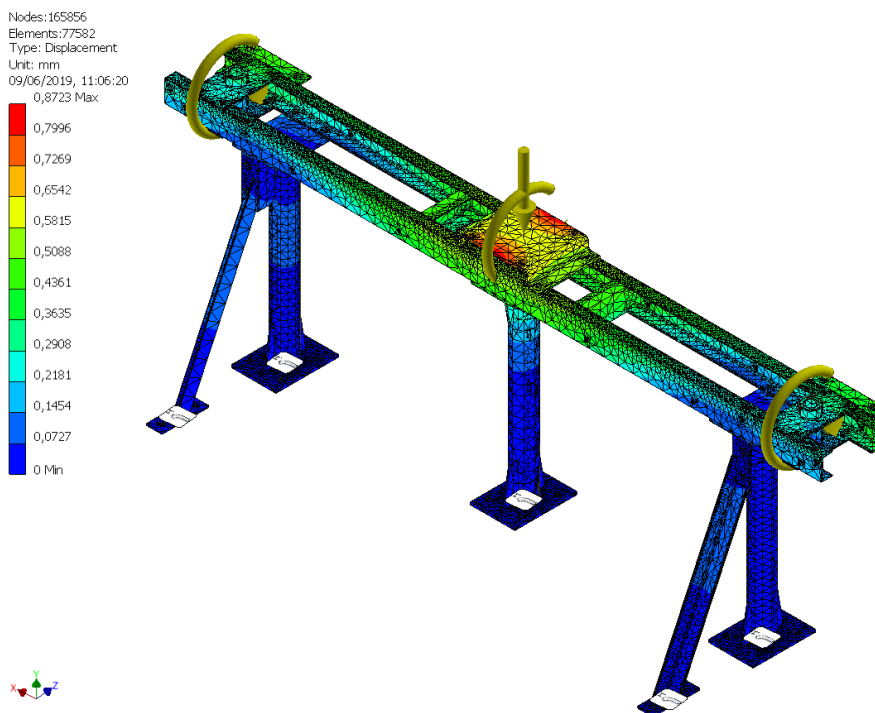


Figura 159- Análise do deslocamento máximo para a posição em trânsito

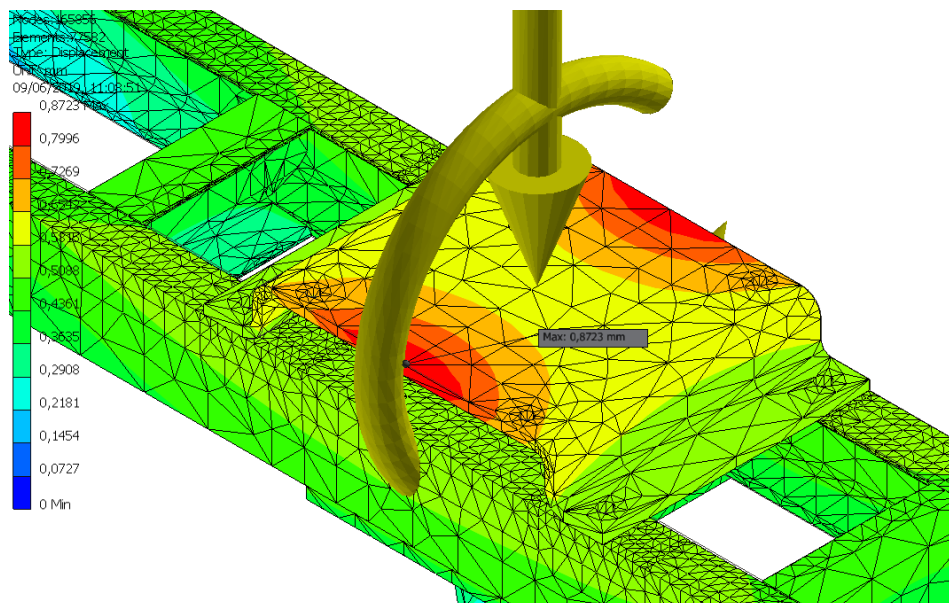


Figura 160- Localização ampliada do deslocamento máximo obtido para a posição em trânsito

O coeficiente de segurança, atingiu o valor mínimo de 1,9 na quinagem da chapa base do braço central (Figura 161).

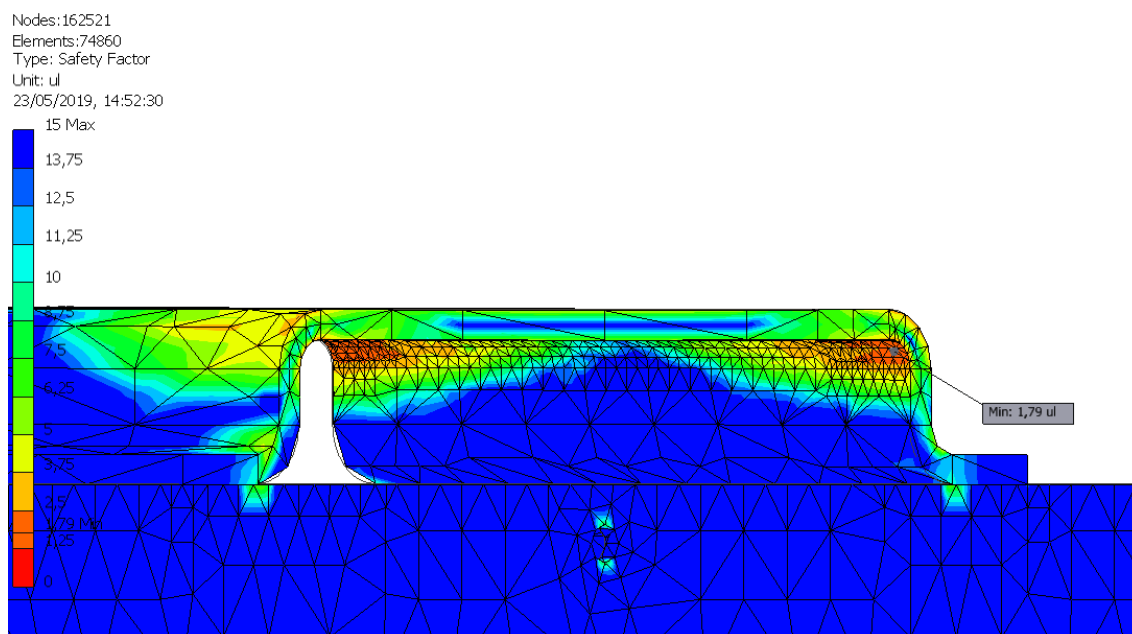


Figura 161- Localização do coeficiente mínimo de segurança para a posição em trânsito

Deste modo, após aplicadas as otimizações à base de assentamento da estrutura, a nova massa é de 171,3 kg (Figura 162).

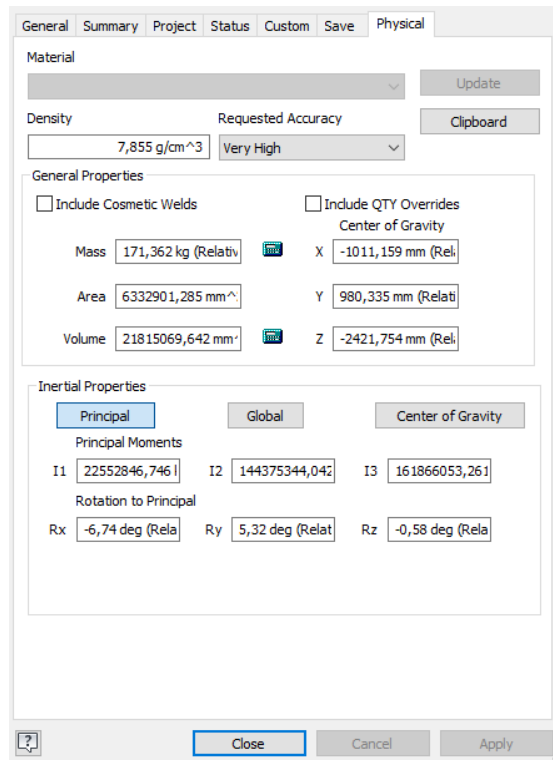


Figura 162- Propriedades físicas da base de assentamento otimizada

Assim sendo, é possível observar as diferenças nos valores obtidos antes e depois da aplicação das otimizações (Tabela 18) na base de assentamento, o que mostra que houve uma diminuição da massa em 27,3 kg.

Tabela 18- Tabela comparativa entre a 1ª análise e 2ª análise da base de assentamento

	1ª análise		2ª análise	
	Serviço	Trânsito	Serviço	Trânsito
Tensão de von Mises (MPa)	57,7	57,6	131,5	144,7
Deslocamentos (mm)	0,3	0,3	0,9	0,9
Coefficiente de segurança mínimo	4,7	4,7	2,1	1,9
Massa (kg)	198,6		171,3	

3.5.5 Dimensionamento do sistema de acionamento

Para o sistema de acionamento da rotação que o trans-rupter necessita de fazer foi utilizado um sistema de *screw jack* (Figura 163). Este sistema consiste numa caixa angular e fuso num sistema só. O acionamento do *screw jack* deverá poder ser feito tanto manualmente como através de aparelhos elétricos pelas laterais da caixa angular.

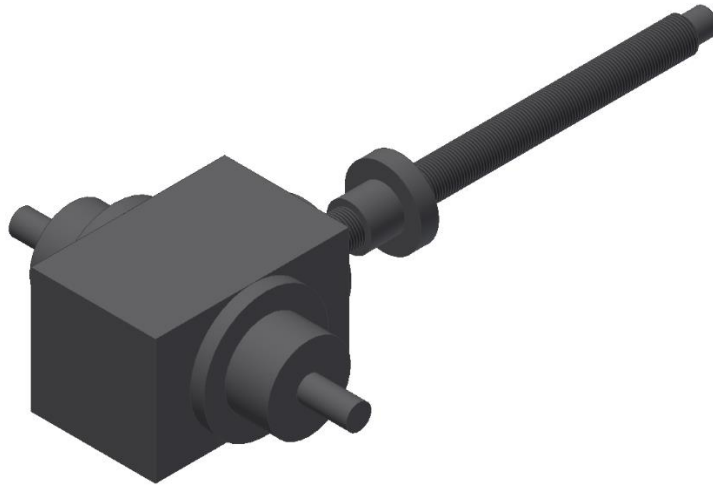


Figura 163- *Screw jack*

Ao observar a ficha técnica do produto é possível verificar que este tem uma capacidade de rotação de uma carga de 15 kN (Figura 164), suficiente para suportar os 1500 N resultantes do peso do trans-rupter. De referir que o sobredimensionamento aparente se deve à disponibilidade deste componente com a relação de transmissão pretendida.

MODEL	Gear Ratio	Capacity (kN)	Raise for One Turn of Worm (mm)	Max Input Torque (N·m)	Backdrive holding torque (N·m)	Torque to raise 1 kN (N·m)	Tare Drag Torque (N·m)	Dynamic Load Ca (kN)
G1BSJ	2:1	15	2.5	50	2.68	0.53	1.80	2.30
	3:1	15	1.6	50	1.16	0.34	1.70	2.30

Figura 164- Características do *Screw jack*

A razão de transmissão foi equacionada ser 2:1 de maneira a que duas voltas na entrada correspondessem a uma volta na saída. Esta redução permite que o utilizador não necessite de grande esforço para fazer a rotação do trans-rupter.

Deste modo, através de um estudo, foi possível determinar o curso do fuso necessário para que o trans-rupter faça a rotação de 60° (Figura 165).

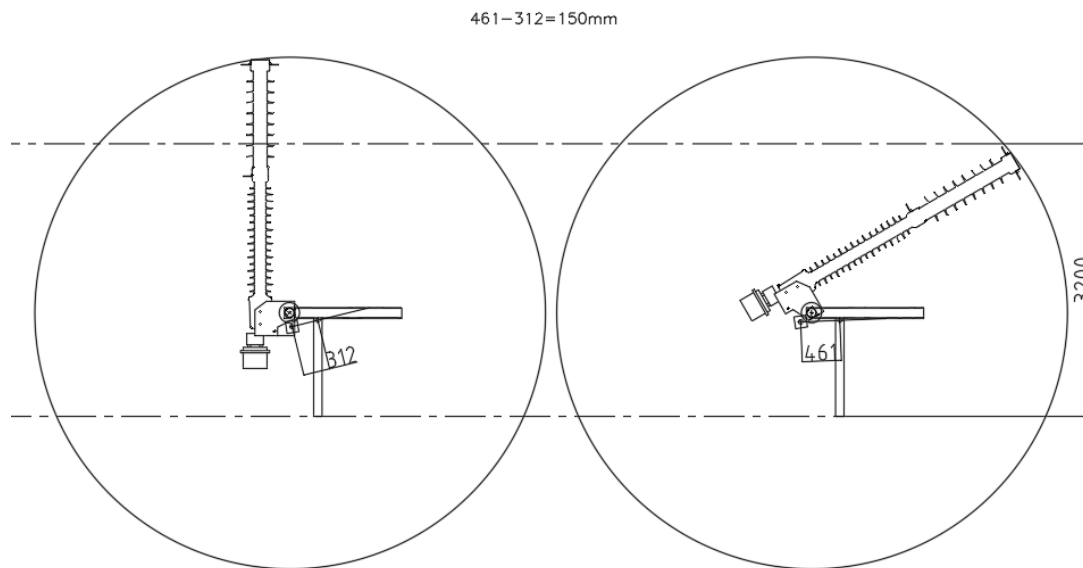


Figura 165- Estudo curso do fuso

Este ainda apresenta uma porca/chumaceira que possui seis furações que servem para fixar este componente à caixa guia do fuso e servir também de guia do fuso.

Para acionar o *screw jack*, foi escolhido um sistema de manivela. Este consiste em colocar porcas sextavadas M20 nos veios laterais do *screw jack* (etapa 1) (Figura 166). De seguida utiliza-se a manivela com a respetiva chave de caixa de dimensões próprias para acoplar na porca e fazer a respetiva rotação para o acionamento do *screw jack* (etapa 2) (Figura 167).

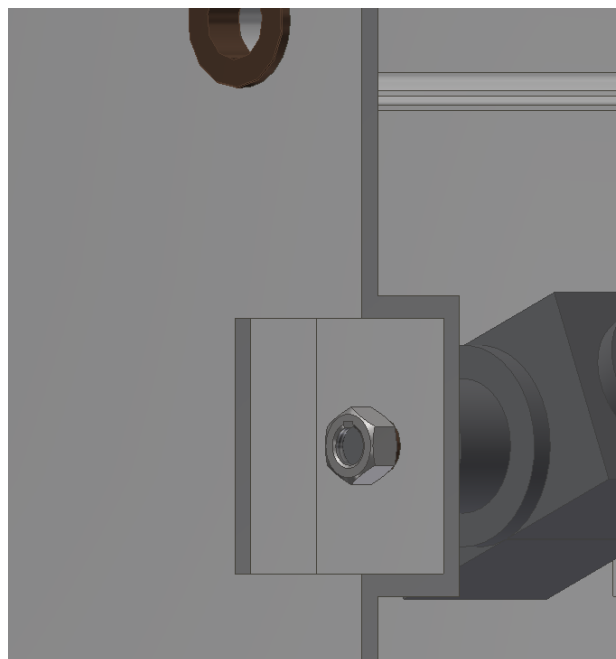


Figura 166- Etapa 1

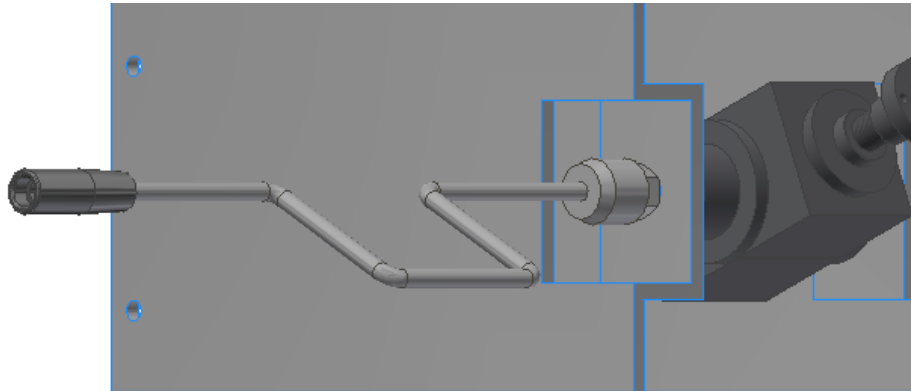


Figura 167- Etapa 2

A porca sextavada (Figura 168) tem um rasgo de maneira a acomodar a chaveta 6x6x25 presente no veio do *screw jack* e que faz a ligação entre o veio e a porca de maneira a que a rotação destas seja sincronizada.

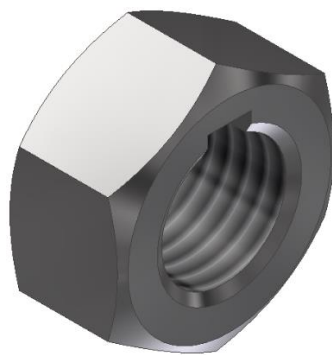
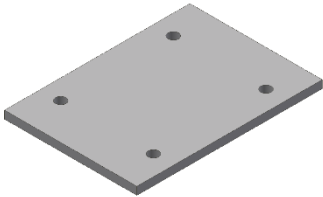


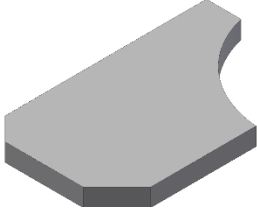



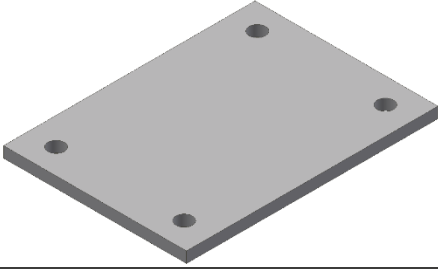
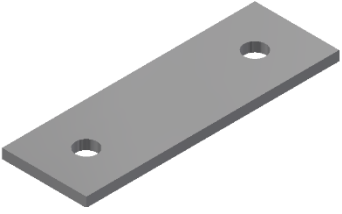
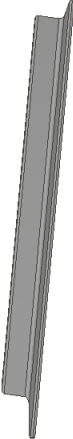
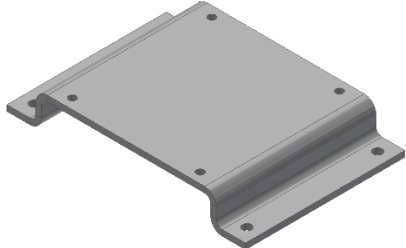

Figura 168- Porca sextavada M20

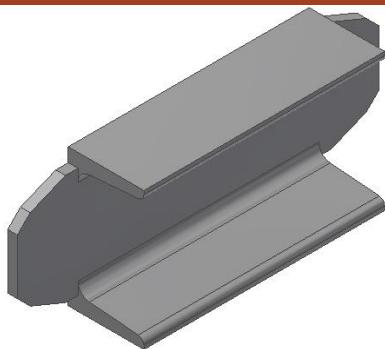
3.5.6 Processos de fabrico

Neste subtópico são apresentados os materiais dos componentes da estrutura e os vários processos (Tabela 19) necessários para o fabrico dos vários componentes constituintes da estrutura que são específicos para esta estrutura ou então alterações realizadas a componentes normalizados mas que necessitam de alterações para serem funcionais na estrutura.

Tabela 19- Lista dos materiais e processos de fabrico dos componentes da estrutura

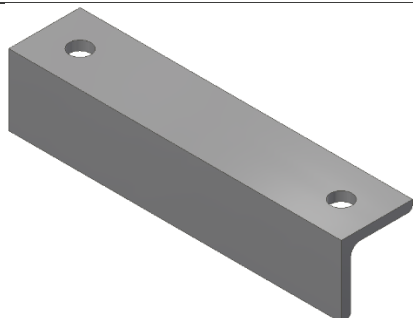
Figura do componente	Designação	Processo de fabrico
	Chapa inferior dos pilares da base de assentamento (Aço S275JR)	<ul style="list-style-type: none"> • Corte laser.
	Cutelos dos pilares da base de assentamento (Aço S275JR)	<ul style="list-style-type: none"> • Corte laser.
	Cantoneira de fixação dos travamentos dos pilares (Aço S275JR)	<ul style="list-style-type: none"> • Corte/lixagem; • Furação executada em máquina de coluna.
	Cutelo da cantoneira dos pilares (Aço S275JR)	<ul style="list-style-type: none"> • Corte laser.
	Perfil tubular (Aço S275JR)	<ul style="list-style-type: none"> • Corte com serrote mecânico.

	<p>Chapa superior dos pilares da base de assentamento (Aço S275JR)</p>	<ul style="list-style-type: none">• Corte laser.
	<p>Chapas dos travamentos dos pilares da base de assentamento (Aço S275JR)</p>	<ul style="list-style-type: none">• Corte laser.
	<p>Cantoneiras dos travamentos dos pilares (Aço S275JR)</p>	<ul style="list-style-type: none">• Corte;• Fresagem.
	<p>Chapa de fixação do braço central à base de assentamento (Aço S275JR)</p>	<ul style="list-style-type: none">• Corte a laser;• Quinagem.
	<p>Perfis UPN da base de assentamento (Aço S275JR)</p>	<ul style="list-style-type: none">• Corte/lixagem;• Furação executada em máquina de coluna.



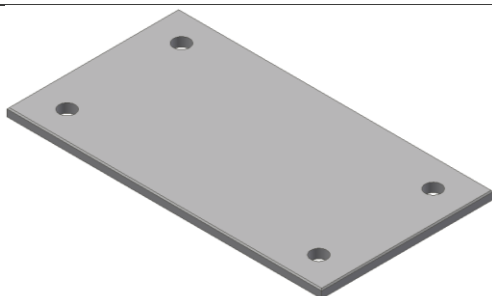
Travamentos dos perfis da base de assentamento (Aço S275JR)

- Fresagem;
- Corte com serrote mecânico.



Fixação para braços laterais na posição de trânsito (Aço S275JR)

- Corte/lixagem;
- Furação executada em máquina de coluna.



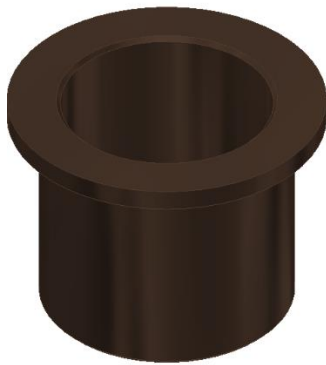
Chapa inferior do sistema de rotação dos braços laterais (Aço S275JR)

- Corte laser;
- Fresagem.



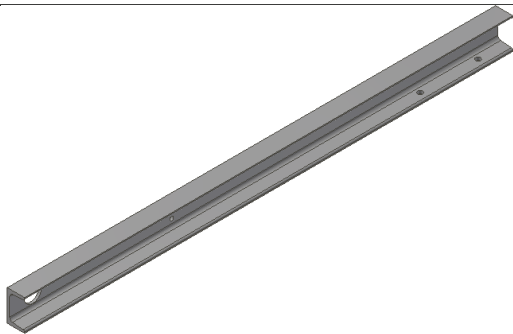
Tubo do sistema de rotação dos braços laterais (Aço S275JR)

- Torneamento.



Casquilho do sistema de rotação dos braços laterais (Bronze CB3)

- Torneamento.



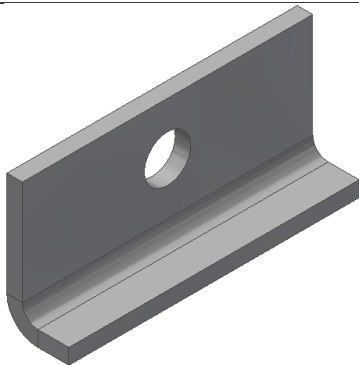
Perfis dos braços laterais (Aço S275JR)

- Corte/lixagem;
- Furação executada em máquina de coluna.



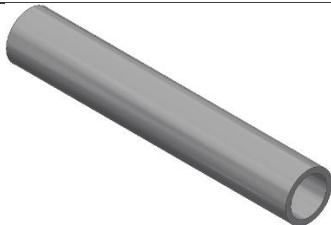
Indicador de rotação do trans-rupter (Aço S275JR)

- Corte a laser;
- Fresagem;
- Torneamento;
- Soldadura.



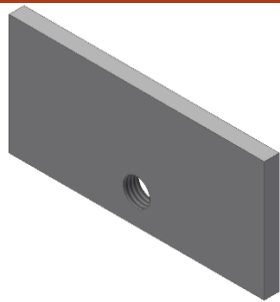
Fixação de rotação do trans-rupter (Aço S275JR)

- Corte a laser;
- Quinagem.



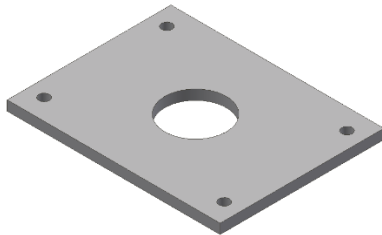
Tubo do braço (Aço S275JR)

- Torneamento.



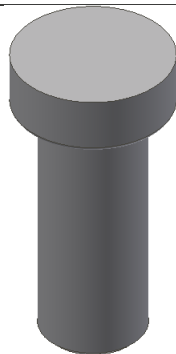
Chapa de união dos perfis dos braços (Aço S275JR)

- Corte a laser;
- Roscagem.



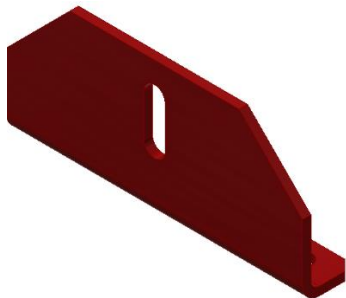
Chapa de ligação dos braços laterais ao sistema de rotação (Aço S275JR)

- Corte a laser.



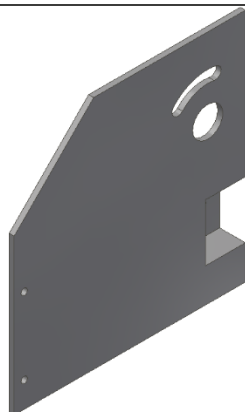
Veio de ligação dos braços laterais ao sistema de rotação (Aço S275JR)

- Torneamento.



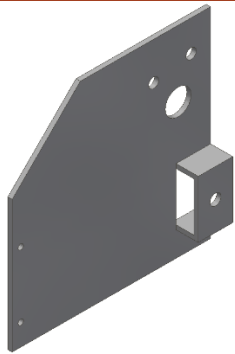





Chapa de fixação dos braços laterais à base de assentamento em posição de trânsito (Aço S275JR)

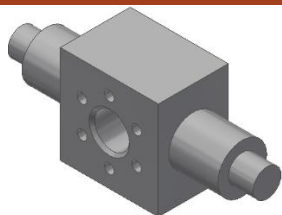
- Corte a laser;
- Quinagem.



Chapa de acoplamento do trans-rupter (Aço S275JR)

- Corte a laser;
- Quinagem;
- Soldadura.

	<p>Chapa de acoplamento do trans-rupter (Aço S275JR)</p>	<ul style="list-style-type: none">• Corte a laser;• Quinagem;• Soldadura.
	<p>Casquilho superior das chapas de acoplamento do trans-rupter (Bronze CB3)</p>	<ul style="list-style-type: none">• Torneamento.
	<p>Casquilho inferior das chapas de acoplamento do trans-rupter (Bronze CB3)</p>	<ul style="list-style-type: none">• Tornemanto.
	<p>Perfis do braço central (Aço S275JR)</p>	<ul style="list-style-type: none">• Corte/lixagem;• Furação executada em máquina de coluna.
	<p>Chapas de acoplamento das caixas guias aos braços (Aço S275JR)</p>	<ul style="list-style-type: none">• Corte a laser.
	<p>Casquilhos das chapas de acoplamento das caixas guias aos braços (Bronze CB3)</p>	<ul style="list-style-type: none">• Torneamento.



Caixa-guia do fuso do *screw jack* (Aço S275JR)

- Maquinagem.

3.5.7 Caracterização geral do equipamento

3.5.7.1 Desenho de conjunto

De maneira a apresentar os vários conjuntos e componentes da estrutura são realizados desenhos de conjunto e respetivos desenhos técnicos dos componentes. Através destes desenhos é demonstrado ao fabricante dos componentes e conjuntos várias propriedades dos mesmos como o material e tolerâncias dos componentes.

Como suporte para a realização dos desenhos técnicos em termos de ajustamentos foi utilizado o livro de Morais (2006). Em termos de cotagem das soldaduras foi utilizada a norma ISO 2553:2019 (2019).

Estes desenhos podem ser consultados no Anexo 6.1 deste documento.

3.5.7.2 Subconjuntos

De maneira a simplificar a estrutura, foram considerados vários subconjuntos que, quando montados uns com os outros, formam o conjunto total da estrutura de suporte do trans-rupter.

Na parte inferior da estrutura, foram criados 3 subconjuntos, cada um referente a cada pilar (Figura 169) que têm como função suportar a base de assentamento da estrutura. Estes pilares são compostos por duas chapas, uma inferior e outra superior, que fazem a ligação ao chão e à base de assentamento, respetivamente. Os pilares são feitos em tubo estrutural redondo soldado a ambas as chapas inferior e superior, reforçado seguidamente por cutelos soldados às chapas e ao tubo. Todos estes componentes serão fabricados em aço S275JR com uma proteção à corrosão de galvanização.

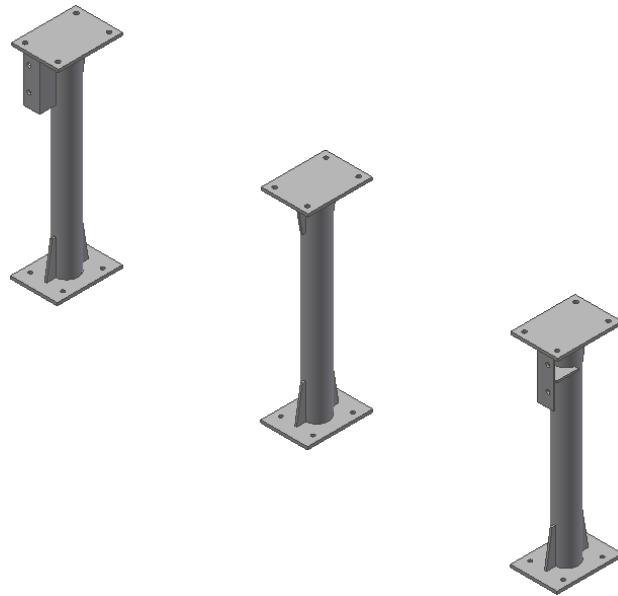


Figura 169- Pilares da base de assentamento

De notar que nos pilares laterais existe uma cantoneira na parte superior que serve como fixação para os travamentos dos pilares (Figura 170). Estes travamentos servem para dar um maior suporte à estrutura e reduzir os efeitos das vibrações a que a estrutura vai estar sujeita. Tal como os pilares, estes travamentos são fabricados com aço S275JR com proteção à corrosão por galvanização.

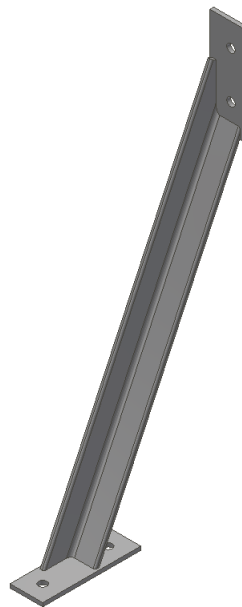


Figura 170- Travamentos dos pilares da base de assentamento

Os travamentos (Figura 170) são compostos por uma chapa inferior, que faz a ligação ao chão por ligações aparafusadas, uma chapa superior, que faz a ligação aos pilares da

base de assentamento, e uma cantoneira que serve como principal componente para o efeito de travamento pretendido.

Outro subconjunto da estrutura é a base de assentamento (Figura 171). Esta é constituída pelos perfis e travamentos que constituem a maior parte da base de assentamento, por dois sistemas de rotação dos braços laterais e uma chapa de fixação do braço central.

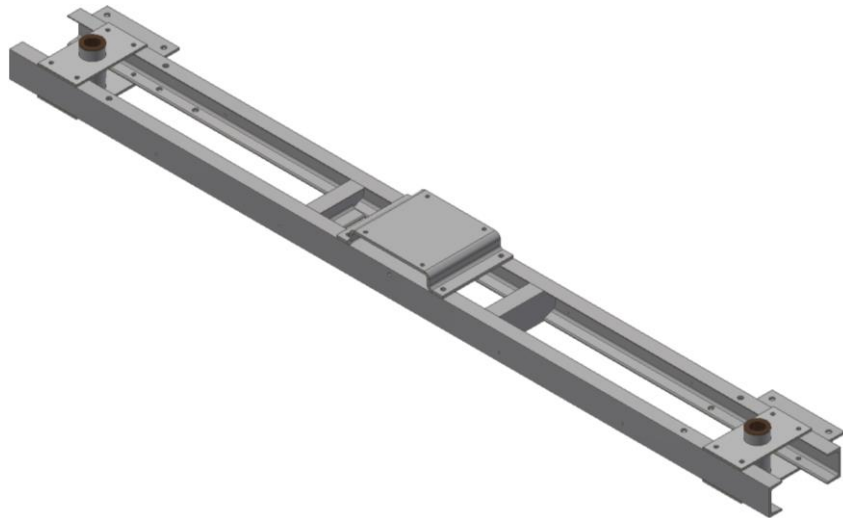


Figura 171- Base de assentamento da estrutura

Os componentes da base de assentamento são maioritariamente aço S275JR. Apenas os casquilhos dos sistemas de rotação dos braços laterais são de bronze CB3. A principal função da base de assentamento é suportar os braços da estrutura.

Os braços da estrutura (Figura 172) têm como função suportar os trans-rupters, garantir a distância de isolamento entre eles e realizar a rotação de maneira a que sejam cumpridos os requisitos de altura máxima. Todos os componentes deste subconjunto são de aço S275JR, exceto os casquilhos que são de bronze CB3.

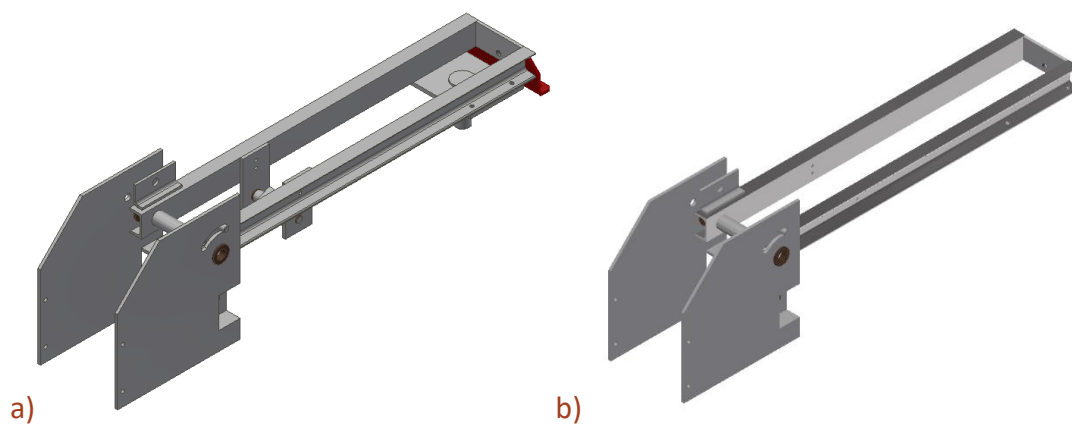


Figura 172- Braço lateral da estrutura a) e braço central da estrutura b)

O último subconjunto da estrutura é o que contém a caixa guia (Figura 173) do fuso do *screw jack*. Este subconjunto é constituído pela caixa guia, a chapa de acoplamento da caixa guia aos braços da estrutura e os casquilhos deste sistema. Este conjunto tem como função guiar e apoiar o fuso do *screw jack* e auxilia na rotação deste. As chapas e a caixa guia são de aço S275JR e os casquilhos de Bronze CB3.

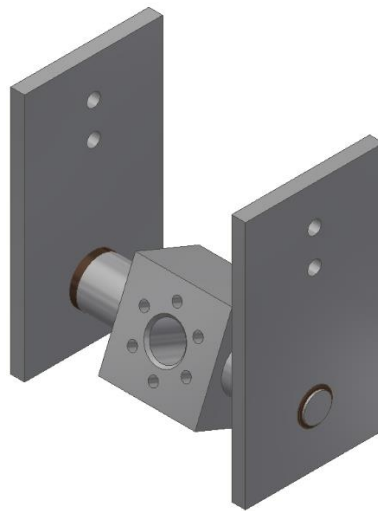





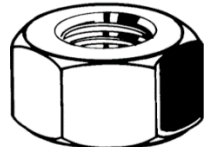



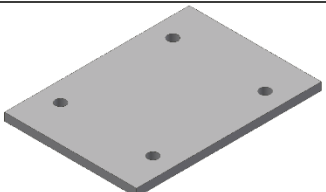
Figura 173- Subconjunto da caixa guia



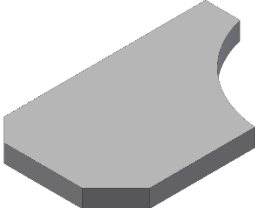

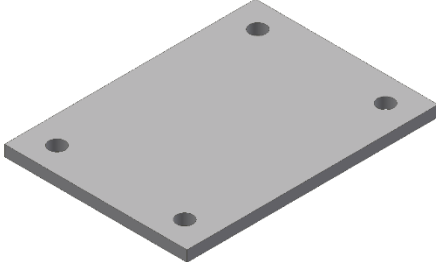
3.5.8 Lista de peças, componentes e dispositivos

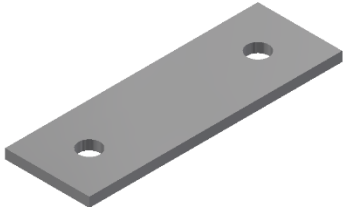
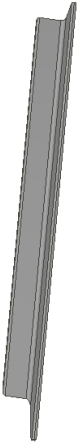
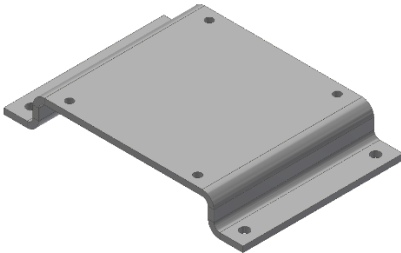

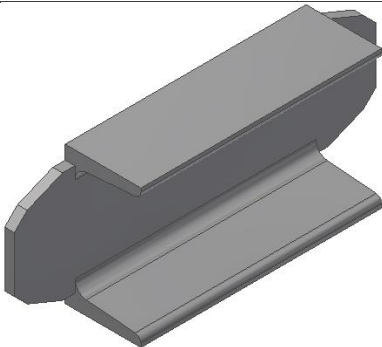
No presente subtópico são apresentados os vários componentes que constituem a estrutura (Tabela 20). São apresentados todos os componentes, de maneira a existir uma maior compreensão da quantidade e tipo de componentes utilizados, que têm importância em toda a geometria da estrutura.

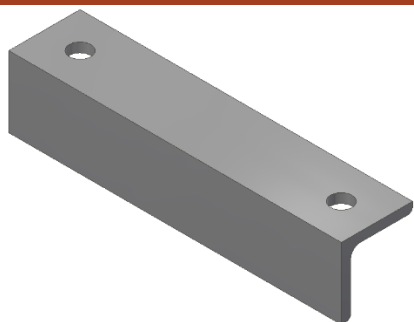
Tabela 20- Lista de componentes da estrutura

Figura do componente	Designação	Fornecedor
	<i>Bevel gear screw jack</i>	Nook Industries

	Chaves de caixa 1/2" sextavadas métricas	FACOM
	Manivela 1/2"	FACOM
	Parafuso sextavado 8.8 métrico galvanizado a quente (01400)	FABORY
	Porca sextavada zincada (01300)	FABORY
	Anilha plana sem chanfro (38031)	FABORY
	Anilha Mola com pontas quadradas GALVANIZADO A QUENTE	FABORY
	Anilha quadrada 8% para seções em U DIN 434 Aço 100-250 HV10 Galvanizado a quente	FABORY
	Chapa	Couto e Lopes

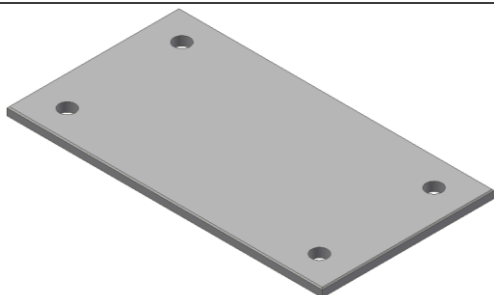
	<p>Couto e Lopes</p> <p>Chapa 8 mm</p>
	<p>Couto e Lopes</p> <p>Cantoneira de fixação dos travamentos dos pilares</p>
	<p>Couto e Lopes</p> <p>Cutelo da cantoneira dos pilares</p>
	<p>Couto e Lopes</p> <p>Perfil tubular</p>
	<p>Couto e Lopes</p> <p>Chapa superior dos pilares da base de assentamento</p>

	Chapas dos travamentos dos pilares da base de assentamento	Couto e Lopes
	Cantoneiras dos travamentos dos pilares	Couto e Lopes
	Chapa de fixação do braço central à base de assentamento	Couto e Lopes
	Perfis UPN da base de assentamento	Couto e Lopes
	Travamentos dos perfis da base de assentamento	Couto e Lopes



Couto e Lopes

Fixação para
braços laterais
na posição de
trânsito



Couto e Lopes

Chapa inferior
do sistema de
rotação dos
braços laterais



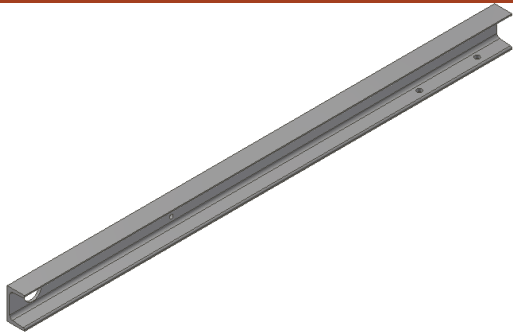
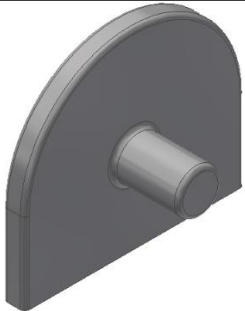
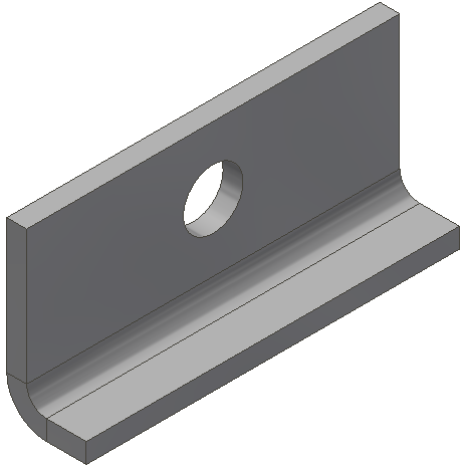
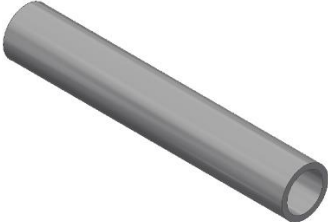
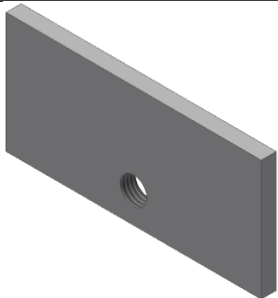
Couto e Lopes

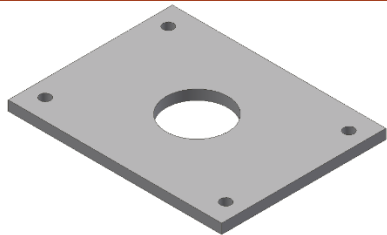
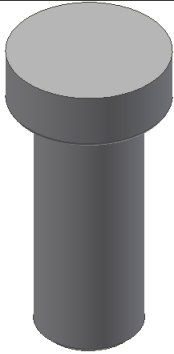
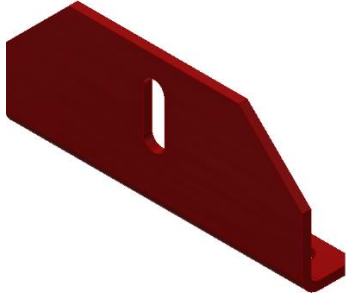
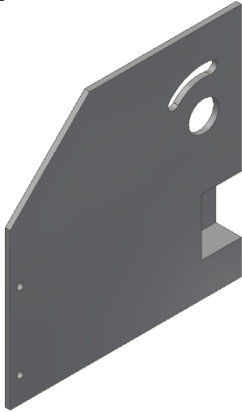
Tubo do
sistema de
rotação dos
braços laterais

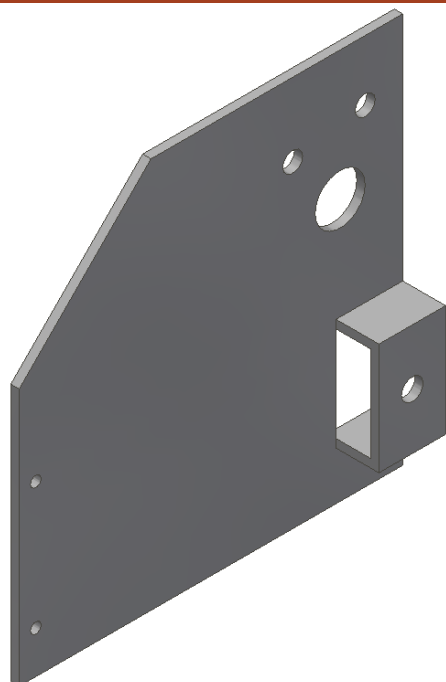


Couto e Lopes

Casquilho do
sistema de
rotação dos
braços laterais

	Perfis dos braços laterais	Couto e Lopes
	Indicador de rotação do trans-rupter	Couto e Lopes
	Fixação de rotação do trans-rupter	Couto e Lopes
	Tubo do braço	Couto e Lopes
	Chapa de união dos perfis dos braços	Couto e Lopes

	Chapa de ligação dos braços laterais ao sistema de rotação	Couto e Lopes
	Veio de ligação dos braços laterais ao sistema de rotação	Couto e Lopes
	Chapa de fixação dos braços laterais à base de assentamento em posição de trânsito	Couto e Lopes
	Chapa de acoplamento do trans-rupter	Couto e Lopes



Chapa de
acoplamento
do trans-
rupter

Couto e Lopes



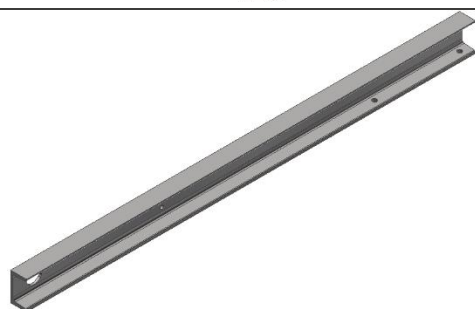
Casquilho
superior das
chapas de
acoplamento
do trans-
rupter

Couto e Lopes





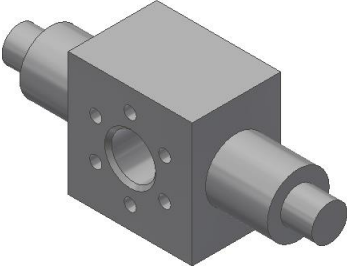
Casquilho
inferior das
chapas de
acoplamento
do trans-
rupter

Couto e Lopes



Perfis do
braço central

Couto e Lopes

	Chapas de acoplamento das caixas guias aos braços	Couto e Lopes
	Casquilhos das chapas de acoplamento das caixas guias aos braços	Couto e Lopes
	Caixa-guia do fuso do <i>screw jack</i>	Couto e Lopes

3.5.9 Montagem do equipamento

Para a montagem do equipamento, tendo já os subconjuntos soldados e prontos a montar, em primeiro lugar, os pilares da base de assentamento são aparafusados ao chão (Figura 174) por conjuntos constituídos por um parafuso hexagonal M16x90, duas anilhas M16, uma anilha de pressão M16 e uma porca hexagonal M16.

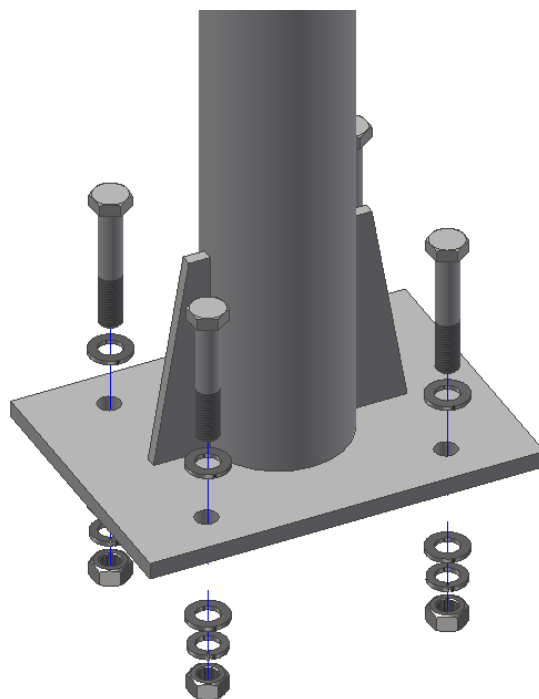


Figura 174- Etapa 1: Montagem dos pilares da base de assentamento

De seguida, são montados os travamentos dos pilares da base de assentamento (Figura 175- Etapa 2: Montagem dos travamentos nos pilares da base de assentamento) por meio de conjuntos de um parafuso hexagonal M16x50, duas anilhas M16, uma anilha de pressão M16 e uma porca hexagonal M16.



Figura 175- Etapa 2: Montagem dos travamentos nos pilares da base de assentamento

A etapa seguinte passa por fazer a ligação dos travamentos ao chão (Figura 176- Etapa 3: Montagem dos travamentos ao chão) por meio de dois conjuntos de um parafuso hexagonal M16x60, duas anilhas M16, uma anilha de pressão M16 e uma porca hexagonal M16.

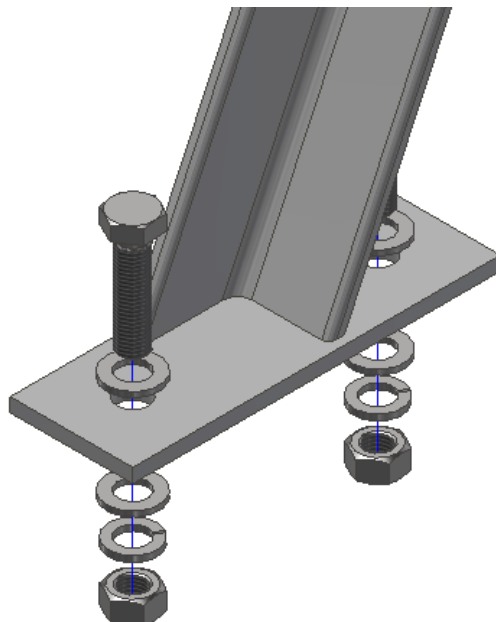


Figura 176- Etapa 3: Montagem dos travamentos ao chão

A seguir, é feita a montagem da base de assentamento (Figura 177) nos pilares por 12 conjuntos de ligações aparafusadas compostos por um parafuso hexagonal M16x50, duas anilhas M16, uma anilha quadrada M16 e uma porca hexagonal M16.

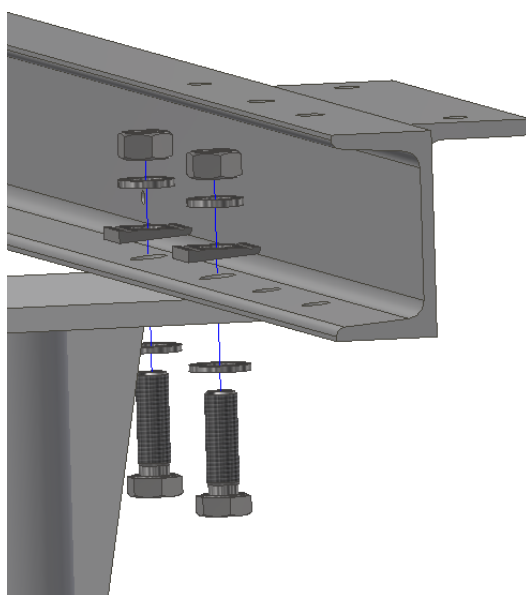


Figura 177- Etapa 4: Montagem da base de assentamento

Na base de assentamento são montados seguidamente os sistemas de rotação dos braços laterais e chapa de fixação do braço central. Para os sistemas de rotação dos braços laterais, foram utilizadas ligações aparafusadas constituídas por um parafuso hexagonal M12x50, uma anilha plana M12, uma anilha quadrada M12, uma anilha de pressão M12 e uma porca hexagonal M12.

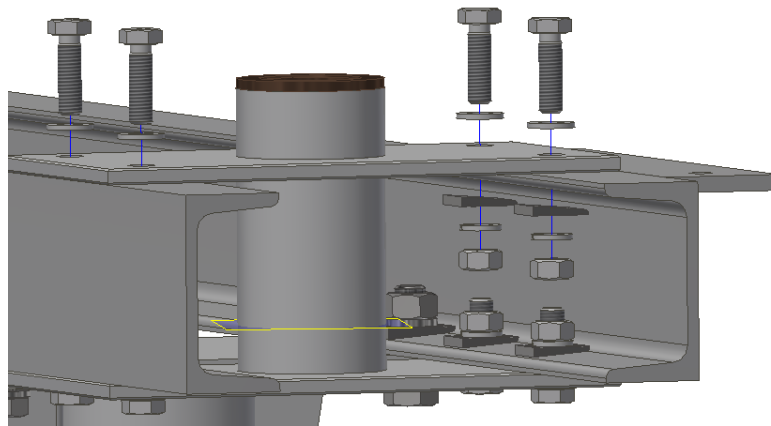


Figura 178- Etapa 5: Montagem dos sistemas de rotação dos braços laterais

Deste modo, foi feita a montagem do braço central à chapa de fixação à base de assentamento (Figura 179). Para isto são utilizados conjuntos de um parafuso hexagonal M12, uma anilha plana M12, anilha quadrada M12, anilha de pressão M12 e porca hexagonal M12.

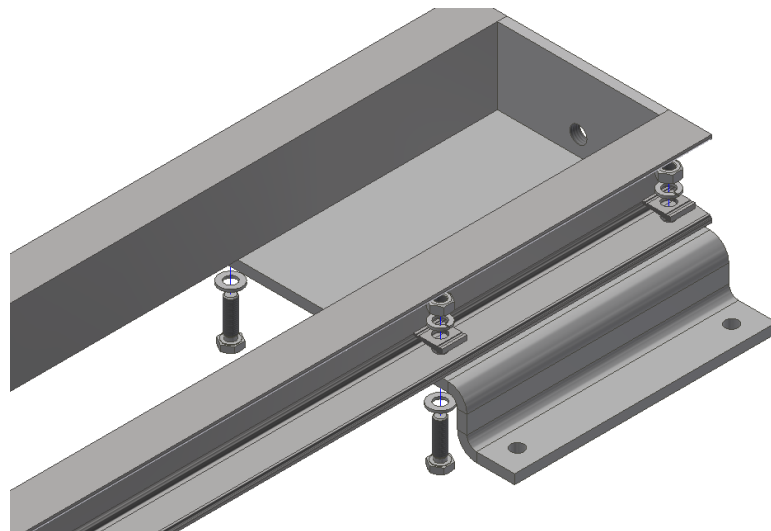


Figura 179- Etapa 6: Montagem do braço central à chapa de fixação à base de assentamento

Para a montagem da chapa de fixação do braço central da estrutura (Figura 180) são utilizados 4 conjuntos de um parafuso hexagonal M12x40, uma anilha plana M12, uma anilha quadrada M12, uma anilha de pressão M12 e uma porca hexagonal M12.

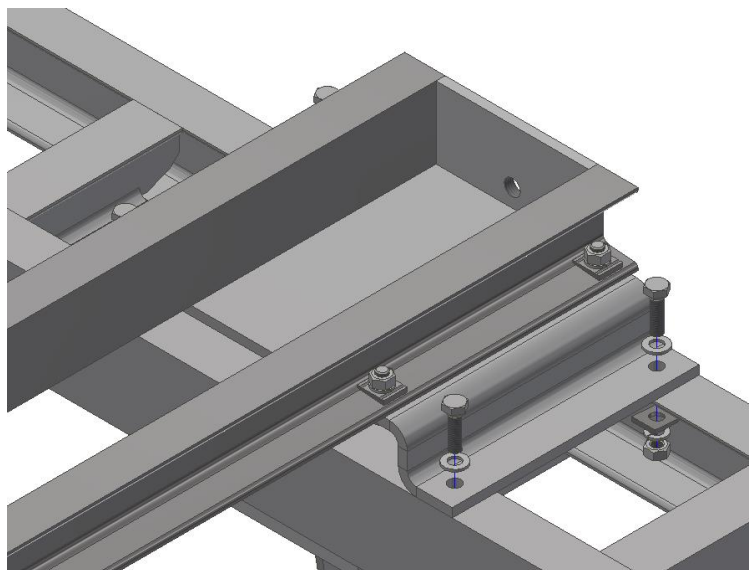


Figura 180- Etapa 7: Montagem do braço central e chapa de fixação à base de assentamento

De seguida, é feita a montagem dos braços laterais nas chapas que fazem a ligação aos sistemas de rotação na base de assentamento (Figura 181). Esta ligação é feita por 4 conjuntos constituídos por um parafuso hexagonal M12x40, uma anilha plana M12, uma anilha quadrada M12, uma anilha de pressão M12 e uma porca hexagonal M12.

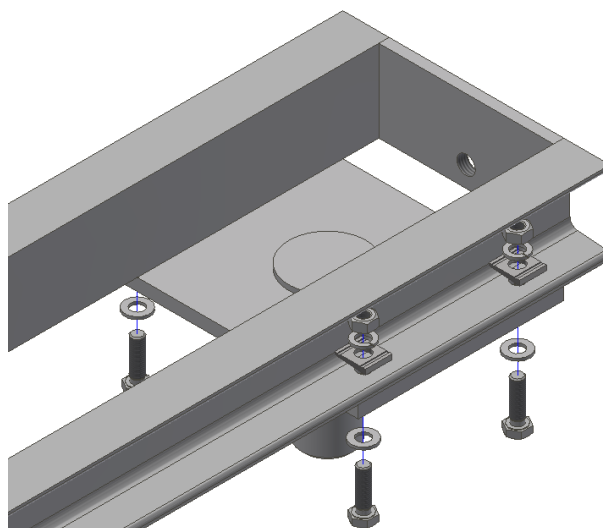


Figura 181- Etapa 8: Montagem dos braços laterais nas chapas que fazem ligação aos sistemas de rotação

O passo seguinte é montar os braços na base de assentamento. Esta montagem é realizada com a inserção do veio dos braços laterais nos sistemas de rotação já presentes na base de assentamento (Figura 182).

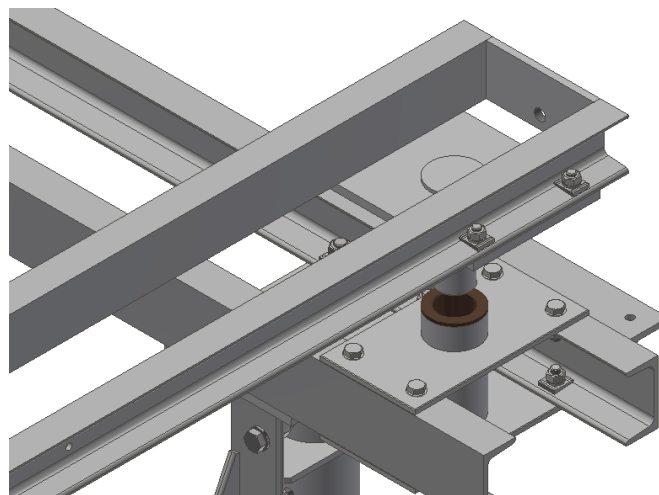


Figura 182- Etapa 9: Montagem dos braços laterais na base de assentamento

De seguida, foram colocadas as chapas de acoplamento do trans-rupter nos braços esta ligação (Figura 183) é efetuada por um veio de ligação e travado por dois freios M33 e um conjunto de parafuso hexagonal M16, duas anilhas planas M16, uma anilha de pressão M16 e uma porca hexagonal M16.

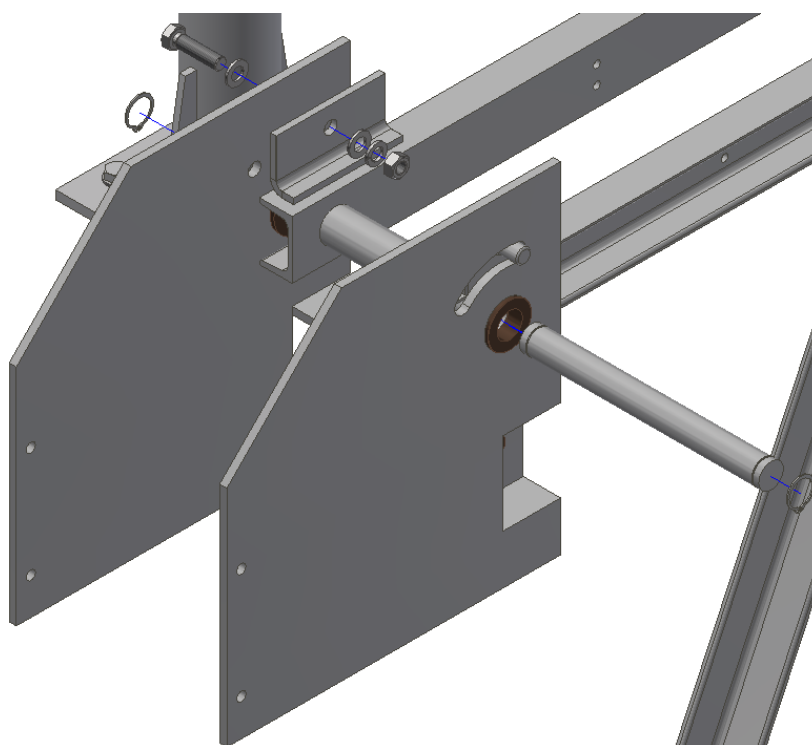


Figura 183- Montagem das chapas de acoplamento do trans-rupter nos braços

Deste modo, existem condições para a montagem das caixas guias do fuso do *screw jack* nos braços da estrutura (Figura 184). A montagem é feita por 4 conjuntos de ligações aparafusadas constituídas por um parafuso hexagonal M8x40, duas anilhas planas M8, uma anilha de pressão M8 e uma porca hexagonal M8.

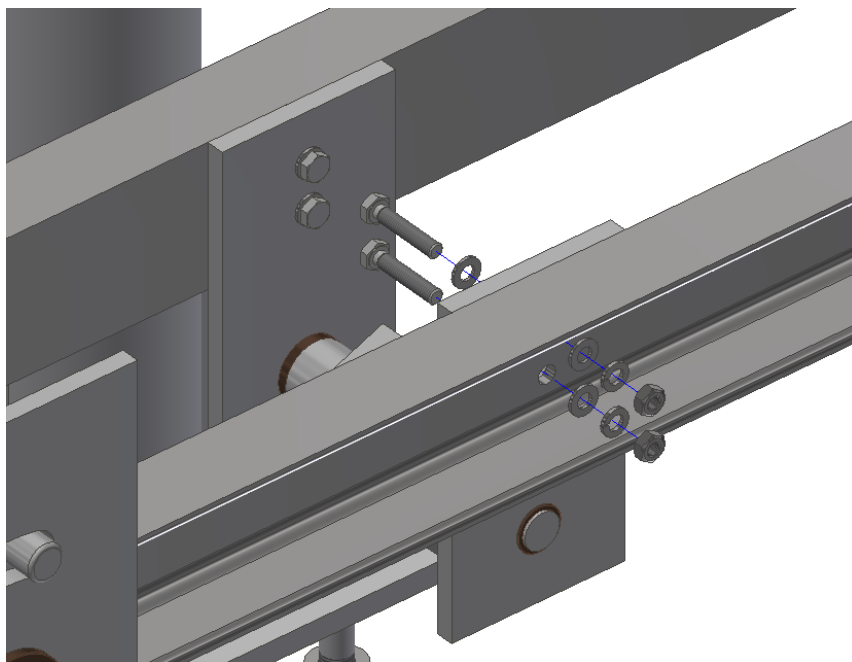


Figura 184- Etapa 10: Montagem das caixas guia nos braços da estrutura

Por último são montados os trans-rupters nas chapas de acoplamentos presentes nos braços da estrutura (Figura 185). Estes são montados através de 4 ligações aparafusadas compostas por um parafuso hexagonal M12x40, uma anilha de pressão M12 e uma anilha plana M12.

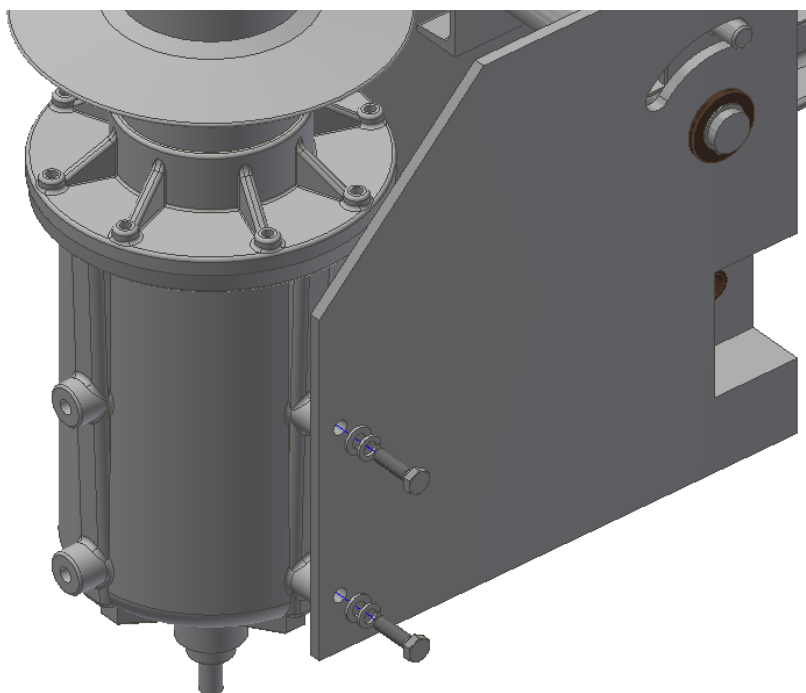


Figura 185- Etapa 11: Montagem dos trans-rupter nas chapas de acoplamento

3.5.10 Manual de manutenção

De maneira a prolongar a vida útil da estrutura deve ser realizada uma manutenção regular dos vários componentes da estrutura. Deste modo devem ser tidas em conta as manutenções preventivas e manutenções corretivas. A manutenção desta estrutura deve ser realizada quando não existe qualquer tipo de energização do sistema em que o equipamento suportado esteja energizado.

Em termos de manutenção preventiva deve ser tida em conta a inspeção regular dos vários componentes através de:

- Inspeção dos componentes metálicos de maneira a evitar o aparecimento de corrosão e fissuras;
- Controlar o aperto das ligações aparafusadas dos elementos da estrutura;
- Controlo do desgaste dos componentes onde existem partes móveis;
- Controlo da lubrificação do *screw jack* de maneira a que não haja constrangimentos no seu acionamento.

Deste modo, em termos de inspeção de desgaste de componentes, esta deve ser realizada em todos os locais que apresentem partes móveis, como nas chapas de acoplamento do trans-rupter, nas caixas guia dos fusos dos *screw jacks* (Figura 186) e nos sistemas de rotação dos braços laterais (Figura 187).

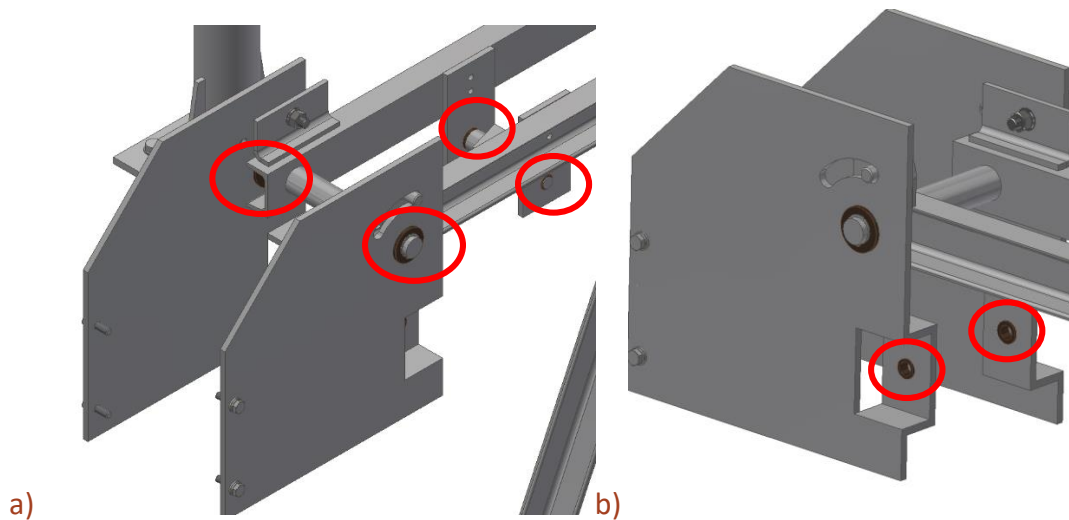


Figura 186- Zonas de inspeção de desgaste nos braços da estrutura e caixas guia: vista frontal a) e vista traseira b)

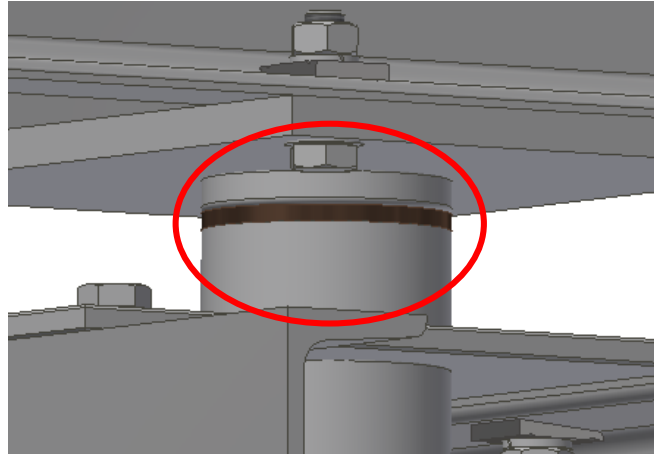


Figura 187- Zona de desgaste no sistema de rotação dos braços laterais

Apesar dos componentes serem fabricados com uma proteção contra a corrosão, estes devem ser inspecionados regularmente nos componentes e nas ligações tanto aparafusadas como as ligações soldadas de maneira a prevenir possíveis fissuras e consequente rotura, o que pode levar ao colapso da estrutura.

De forma a ter uma manutenção planeada realizou-se um resumo das ações de manutenção (Tabela 21) necessárias para o bom funcionamento da estrutura a longo prazo. A informação obtida é proveniente de histórico provido pela EFACEC. De notar que consoante a utilização e condições atmosféricas a que a estrutura está sujeita os períodos de manutenção podem variar.

Tabela 21- Plano de manutenção da estrutura

Periodicidade	Componente	Ação
Anualmente	Casquilhos	Verificar existência de fissuras
	Ligações aparafusadas	Verificar existência de fissuras, corrosão e folgas
	Ligações soldadas	Verificar existência de fissuras e corrosão
Regularmente	Caixa redutora	Controlo funcional e lubrificação
	Fuso	Controlo funcional e verificação de empenos e fissuras

3.5.11 Análise FMEA

A análise FMEA (*Failure and Effects Analysis*) é utilizada de maneira a evitar a ocorrência de falhas num equipamento. Através desta análise é possível determinar o que provoca cada falha possível no equipamento, o que torna possível a redução do risco de falhas durante o projeto.

Deste modo, para a realização desta análise são concedidos níveis aos campos referentes à:

- Severidade (
- Tabela 22);
- Detecção (Tabela 23);
- Probabilidade de falha (Tabela 24).

Tabela 22- Níveis de severidade da análise FMEA

Efeito	Severidade	Índice de severidade
Perigoso sem aviso prévio	Índice de severidade muito alto quando o modo de falha afeta a segurança na operação do veículo ou envolve não conformidade com a legislação governamental sem aviso prévio	10
Perigoso com aviso prévio	Índice de severidade muito alto quando o modo de falha afeta a segurança na operação do veículo ou envolve não conformidade com a legislação governamental com aviso prévio	9
Muito alto	Item inoperável, com perda das funções primárias.	8
Alto	Item operável, mas com nível de desempenho reduzido. Cliente insatisfeito	7
Moderado	Item operável, mas com item de conforto e conveniência inoperável. Cliente sente desconforto	6
Baixo	Item operável, mas com item de conforto e conveniência operável com nível de desempenho reduzido. Cliente sente alguma insatisfação	5
Muito baixo	Forma, acabamento e barulho não conforme. Defeito notado pela maioria dos clientes	4
Menor	Forma, acabamento e barulho não conforme. Defeito notado pela média dos clientes	3
Muito menor	Forma, acabamento e barulho não conforme. Defeito notado por clientes acurados	2
Nenhum	Sem efeito	1

Tabela 23-Níveis de probabilidade de deteção da análise FMEA

Deteção	Probabilidade de deteção pelo controlo de projeto	Índice de deteção
Absoluta incerteza	Controlo de projeto não irá detetar uma causa e subsequente modo de falha; ou não existe controlo de projeto	10
Muito remota	Possibilidade muito remota de o controlo de projeto detetar um mecanismo de causa potencial e modo de falha	9
Remota	Possibilidade remota de o controlo de projeto detetar um mecanismo de causa potencial e subsequente modo de falha	8
Muito baixa	Possibilidade muito baixa de o controlo de projeto detetar um mecanismo de causa potencial e subsequente modo de falha	7
Baixa	Possibilidade baixa de o controlo de projeto detetar um mecanismo de causa potencial e subsequente modo de falha	6
Moderada	Possibilidade moderada de o controlo de projeto detetar um mecanismo de causa potencial e subsequente modo de falha	5
Moderadamente alta	Possibilidade moderadamente alta de o controlo de projeto detetar um mecanismo de causa potencial e subsequente modo de falha	4
Alta	Possibilidade alta de o controlo de projeto detetar um mecanismo de causa potencial e subsequente modo de falha	3
Muito alta	Possibilidade muito alta de o controlo de projeto detetar um mecanismo de causa potencial e subsequente modo de falha	2
Quase certamente	Controlo de projeto irá quase certamente detetar uma causa e subsequente modo de falha; ou não existe controlo de projeto	1

Tabela 24- Níveis de probabilidade de falha da análise FMEA

Probabilidade de falha	Taxa de falhas possíveis	Índice de ocorrência
Muito alta:	≥ 1 em 2	10
falha quase inevitável	1 em 3	9
Alta: falhas frequentes	1 em 8 1 em 20	8 7
Moderada: falhas ocasionais	1 em 80 1 em 400	6 5
Baixa: poucas falhas	1 em 2000 1 em 15000	4 3
Remota: falha é improvável	1 em 150000 ≤ 1 em 1500000	2 1

Assim sendo, após uma enumeração das ocorrências possíveis que podem levar a falhas realizou-se a análise FMEA (Tabela 25).

Tabela 25- Análise FMEA

Instituto Superior de Engenharia do Porto		F.M.E.A. - Failures Mode and Effect Analysis							Data: 08/06/2019								
		Produto: Estrutura de trans-rupter Data do FMEA: 08/06/2019			Equipa de Projecto: João Fernandes Emitido por: João Fernandes				Emissor: João Fernandes								
N.	Componente	Modo potencial de falha	Efeito	G	Causa	O	Meios de controlo	D	NPR	Acções Recomendadas							
										G	O	D	NPR				
1	Screw Jack	Má lubrificação	Não permite a rotação dos trans-rupters	10	Falta de lubrificação da engrenagem do screw jack	10	Inspeção e manutenção periódica a nível de lubrificação	1	100					3	2	2	12
2	Caixa guia	Dificuldade no acionamento do screw jack	Mau desempenho na utilização	10	Desalinhamento da caixa guia com o screw jack	7	Inspeção visual	2	140					2	4	1	8
3	Casquilhos do screw jack	Rotura	Impossibilita rotação do screw jack / Maior desgaste	7	Dimensionamento inadequado	7	Ensaio mecânicos / Inspeção visual	3	147	Novo componente				4	3	2	24
4	Porca de acionamento do screw jack	Rotura	Impossibilidade de acionamento do screw jack	7	Dimensionamento inadequado	8	Ensaio mecânicos / Inspeção visual	1	56	Novo componente				3	3	2	18
5	Casquilhos dos sistemas de rotação dos braços laterais	Rotura	Impossibilita rotação dos braços laterais / Maior desgaste	8	Dimensionamento inadequado	9	Ensaio mecânicos / Inspeção visual	3	216	Novo componente				3	3	2	18
6	Parafusos	Rotura	Impossibilidade de ligar os elementos	8	Dimensionamento inadequado / Material inadequado	9	Ensaio mecânicos	3	216	Outros elementos de ligação / Novo dimensionamento da ligação				3	3	2	18
		Corrosão	Fragilidade dos componentes	8	Tratamento / proteção inadequada / material inadequado	9	Ensaio químico / Inspeção visual	3	216	Outro tipo de ligação / Novo dimensionamento da ligação				3	3	2	18
		Desenrosca	Impossibilidade de ligar os elementos / ligação defeituosa dos elementos	8	Dimensionamento inadequado / Montagem defeituosa	9	Ensaio mecânicos	3	216	Outro tipo de ligação / Novo dimensionamento da ligação				3	3	2	18
7	Soldadura	Rotura	Impossibilidade de ligar os elementos / perda de resistência	8	Procedimento incorreto / Material inadequado	9	Uso de técnicas para deteção de defeitos	3	216	Outro tipo de ligação / Novo dimensionamento da ligação				3	3	2	18
		Corrosão	Fragilidade da ligação	8	Tratamento / proteção inadequada / material inadequado	9		3	216	Outro tipo de ligação / Novo dimensionamento da ligação				3	3	2	18
8	Chapas de fixação dos braços laterais à base de assentamento	Fletir	Fixação incorreta dos braços / Rotação não pretendida dos braços	8	Dimensionamento inadequado	9	Ensaio mecânicos / Inspeção visual	3	216								

3.5.12 Análise de custos


De maneira a analisar o impacto em termos de custos que o fabrico desta estrutura teria foi feita uma consulta dos preços dos componentes em vários fornecedores de maneira a obter preços para os materiais utilizados e para os processos de fabrico associados a cada componente (Tabela 26).





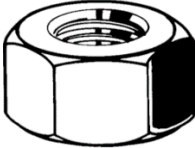
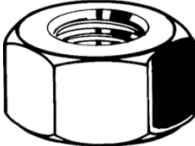
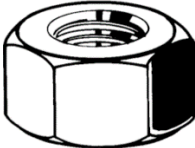


Deste modo para os processos de fabrico foram obtidos os seguintes preços médios:

- Fresadora: 30,00€/h;
- Torno: 30,00€/h;
- CNC: 30,00€/h;
- Corte laser: 120,00€/h;
- Quinadora: 30,00€/h;



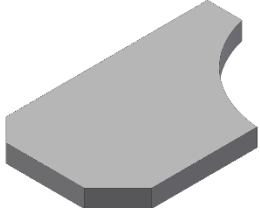
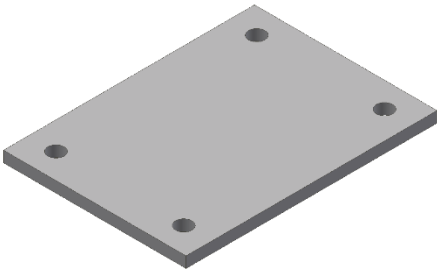
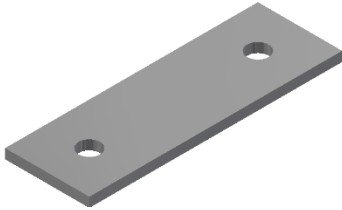
- Soldadura: 35,00€/h.

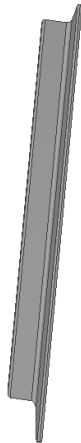
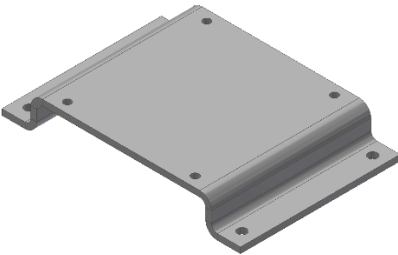
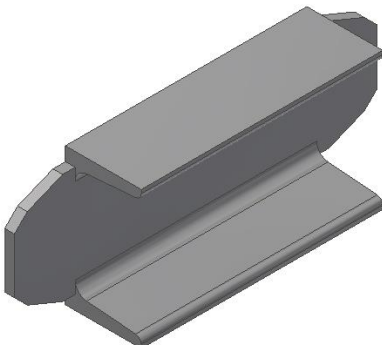
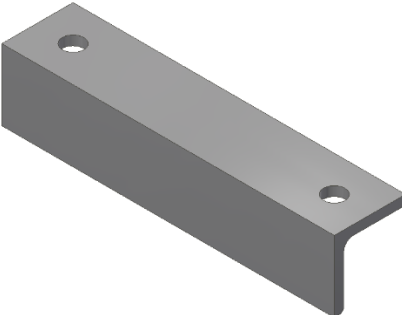
Tabela 26- Análise de custos dos componentes da estrutura

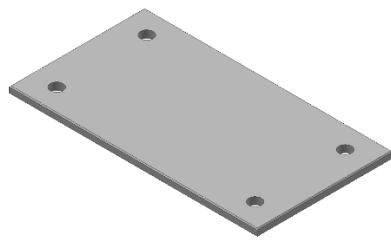
Figura do componente	Designação	Qtd.	Preço
	Bevel gear screw jack	3	1083,98 €
	Chaves de caixa 1/2" sextavadas métricas	1	3,56 €
	Manivela 1/2"	1	16,50 €
	Parafuso sextavado 8.8 métrico galvanizado a quente M8	12	1,99€ (16.61 €/100)
	Parafuso sextavado 8.8 métrico galvanizado a quente M12	44	19,48€ (44,28 €/100)
	Parafuso sextavado 8.8 métrico galvanizado a quente M16	41	38,98€ (95,08 €/100)
	Anilha quadrada 8% para seções em U DIN 434 Aço 100-250 HV10 galvanizado a quente M12	32	8,33€ (26,04€ / 100)

	Anilha quadrada 8% para seções em U DIN 434 Aço 100- 250 HV10 galvanizado a quente M16	12	4,95€ (41,32€ /100)
	Anilha plana sem chanfro M8	24	0,39€ (1,63 €/100)
	Anilha plana sem chanfro M12	44	1,90€ (4,33 €/100)
	Anilha plana sem chanfro M16	70	5,90€ (8,43 €/100)
	Porca sextavada zincada M8	12	0,22€ (1,86 €/100)
	Porca sextavada zincada M12	32	1,41€ (4,41 €/100)
	Porca sextavada zincada M16	41	3,97€ (9,69 €/100)
	Anilha Mola com pontas quadradas galvanizado a quente M8	12	1,10€ (9,20 €/100)
	Anilha Mola com pontas quadradas galvanizado a quente M12	44	8,31€ (18,90 €/100)

	Anilha Mola com pontas quadradas galvanizado a quente M16	41	19,20€ (46,85 €/100)
	Perfil UPN80	6	470€
	Perfil UPN100	5900 mm	54,56 €
	Tubo Aço Redondo 100X4,0	3	58,6€
	Chapa 12 mm	3	113€

	Chapa 8 mm	10	18€
	Cantoneira de fixação dos travamentos dos pilares	2	24€
	Cutelo da cantoneira dos pilares	2	4€
	Chapa superior dos pilares da base de assentamento	3	113€
	Chapas dos travamentos dos pilares da base de assentamento	4	26€

	Cantoneiras dos travamentos dos pilares	2	78,5€
	Chapa de fixação do braço central à base de assentamento	1	78€
	Travamentos dos perfis da base de assentamento	2	36€
	Fixação para braços laterias na posição de trânsito	2	28€



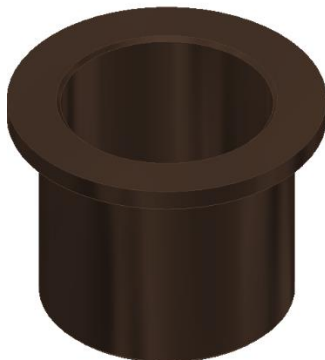
Chapa inferior do sistema de rotação dos braços laterais

2 36€



Tubo do sistema de rotação dos braços laterais

2 28€



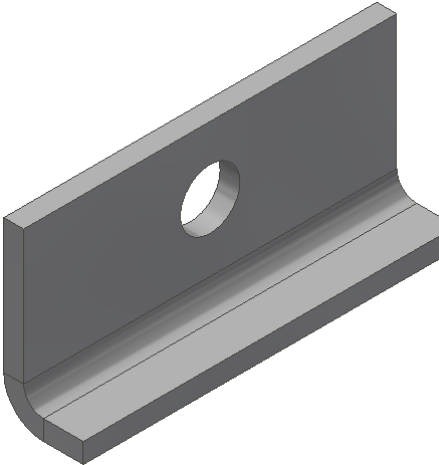
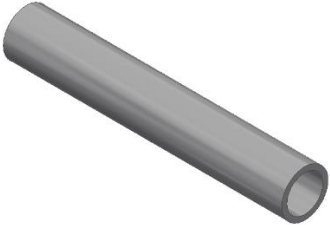
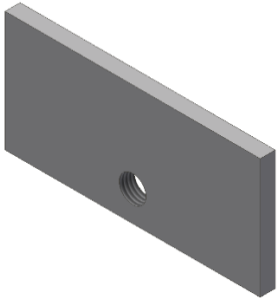
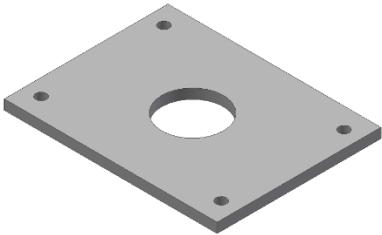
Casquilho do sistema de rotação dos braços laterais

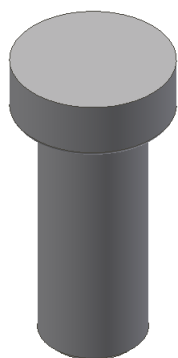
2 1€



Indicador de rotação do transrupter

3 15€

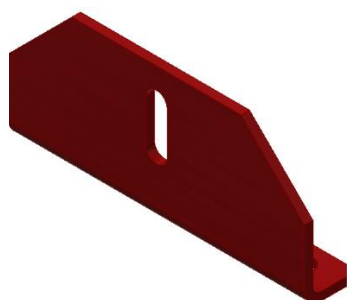
	Fixação de rotação do trans-rupter	3	18€
	Tubo do braço	3	25€
	Chapa de união dos perfis dos braços	3	23€
	Chapa de ligação dos braços laterais ao sistema de rotação	2	60€



Veio de ligação dos
braços laterais ao
sistema de rotação

2

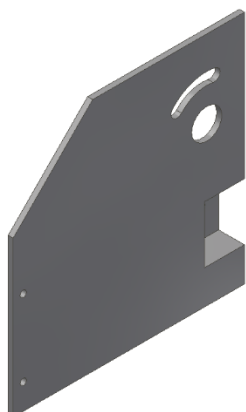
40€



Chapa de fixação
dos braços laterais
à base de
assentamento em
posição de trânsito

2

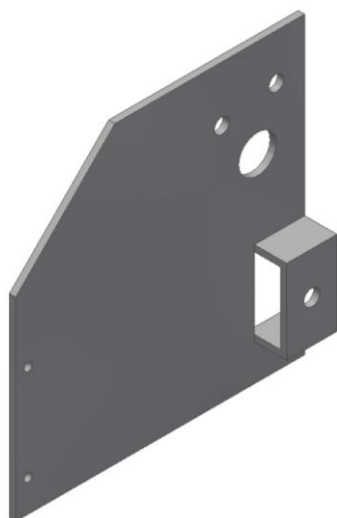
35€



Chapa de
acoplamento do
trans-rupter

3

300€



Chapa de
acoplamento do
trans-rupter

3

300€



Casquilho superior
das chapas de
acoplamento do
trans-rupter

6

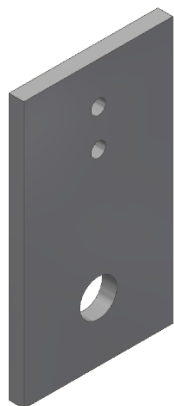
1€



Casquilho inferior
das chapas de
acoplamento do
trans-rupter

6

1€



Chapas de
acoplamento das
caixas guias aos
braços

6

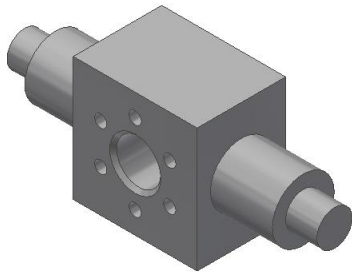
60€



Casquilhos das
chapas de
acoplamento das
caixas guias aos
braços

6

1€



Caixa-guia do fuso
do *screw jack*

3

50€

O preço final da estrutura foi estimado através da consulta a um fornecedor que estimou um valor a rondar os 8000€.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

A EFACEC definiu como objetivo a criação e uma estrutura de suporte dos trans-rupter que cumprisse os requisitos impostos e limitações por parte da legislação. A principal vantagem desta estrutura é o facto de ser de utilização fácil e intuitiva.

O anteprojecto é fulcral para o aparecimento e evolução de várias concepções de ideias. Através do estudo das ideias que surgiram foi possível prever situações de risco que pudessem pôr em causa o projecto durante a montagem da estrutura e possíveis problemas no futuro durante a sua utilização.

Através da realização de simulações pelo MEF foi possível concluir que os componentes de toda a estrutura são capazes de suportar as cargas impostas pela colocação e rotação dos trans-rupters. Desta forma, o projecto cumpre com os requisitos colocados, o que torna a realização da dissertação numa experiência bastante positiva, dado que foi possível criar um produto eficaz e de fácil utilização. Realizar a dissertação numa empresa foi bastante compensador pois permitiu um maior crescimento pessoal e maior motivação para adquirir novas competências.

Como em todos os projectos, existe sempre a possibilidade de uma melhoria contínua de maneira a otimizar o equipamento ou um processo. Para este projecto, algumas otimizações a poderem ser implementadas são: a utilização de ferramenta eléctrica em vez de uma manivela manual para o acionamento da rotação dos trans-rupters; a criação de chanfros em algumas quinas vivas de maneira a evitar grandes danos em caso de choque por parte do utilizador final; utilização de outro tipo de materiais que podem levar a um menor custo sem comprometer a estrutura; utilização de um *screw jack* que não esteja sobredimensionado em termos de suporte de cargas, o que pode levar a uma diminuição das dimensões e conseqüente massa e ter um custo mais reduzido. Resumindo, todas estas otimizações têm como objetivo a aumentar a segurança de utilização, redução de dimensões e redução do custo.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

2553:2019, B. E. I. (2019). Welding and allied processes. Symbolic representation on drawings. Welded joints. Genebra, Suíça, BSI.

ACT. (1995). "Example 1: Reaction Injection Molding (RIM) Process; Automotive Fascia." Retrieved 16/04, 2019, from http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/re_doc/05_case_study.frm.html.

Afolabi, S., B. Oladapo, C. Ijagbemi, A. AdeoyeeJ. Kayode (2018). "Design and finite element analysis of a fatigue life prediction for safe and economical machine shaft." Journal of Materials Research and Technology.

Aghayere, A.eJ. Vigil (2007). Structural Wood Design. A practice-oriented approach using the ASD method. Nova Jérсия, Estados Unidos da América, John Wiley & Sons, Inc.

Almeida, F. A. L. (2012). A MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL- PROJETO DA ESTRUTURA DACOBERTURA DE UM EDIFÍCIO. Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Alves, F. T. (2017). ANÁLISE ESTRUTURAL DE CASCAS COM O ELEMENTO FINITO CSTDKT, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Alves, M. F. (2003). ABC das máquinas, Instituto Superior de Engenharia do Porto.

AZETEK. (2018). "Fusos de esferas e guias lineares." Retrieved 12/05, 2019, from <http://www.azetek.com.br/fusos-esferas-guias-lineares>.

Bhatti, M. A. (2005). Fundamental Finite Element Analysis and Applications, JOHN WILEY & SONS, INC.

Bjorhovde, R. (2004). "Development and use of high performance steel." Journal of Constructional Steel Research

Bolotinha, M. (2015). "TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA - PRINCÍPIOS TEÓRICOS." Retrieved 01/05, 2019, from <https://www.linkedin.com/pulse/transformadores-de-pot%C3%Aancia-principios-te%C3%B3ricos-manuel-bolotinha>.

Bryan, C. (2016). "BAR ELEMENT IN 2D (TRUSS, LINK)." from <https://slideplayer.com/slide/8924455/>.

Budynas, R. G. N., J. K. (2008). Shigley's Mechanical Engineering Design.

Campilho, R. D. S. (2012). Método de elementos finitos, Publindustria, Edições Técnicas, Lda.

CEN (2010). Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Caparica, Portugal, Instituto Português da Qualidade.

CEN (2010). "Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço Parte 1-8: Projeto de ligações."

CEN (2011). Hexagon head bolts - Product grades A and B (ISO 4014:2011).

CHAGAS Chapas.

Chandrupatla, T. R. B., A. D. (1997). Introduction to Finite Elements in Engineering, Pearson Education.

CIRCUITGLOBE. "Tap-changing Transformers." Retrieved 29/05, 2019, from <https://circuitglobe.com/tap-changing-transformers.html>.

CIRCUTOR. (2018). "Os três pilares da transição energética." Retrieved 14/05, 2019, from <http://circuitor.es/pt/produtos/artigos-destacados/4383-os-tres-pilares-da-transicao-energetica>.

CMM. Retrieved 21/04, 2019, from <https://www.cmm.pt/site/>.

Connor, J. J.eS. Faraji (2012). Fundamentals of Structural Engineering, Springer Science+Business Media.

CONTIBRONZES. (2018). "Bronzes ao Estanho." Retrieved 15/06, 2019, from <https://www.contibronzes.com/ligas/bronzes-ao-estanho/>.

Cook, R. D. (1995). Finite Element Modeling for Stress Analysis. Nova Iorque, E.U.A., JOHN WILEY & SONS, INC.

Costa, B. (2014). Conceção e dimensionamento do chassis e sistema de travagem de um veículo de competição do tipo Formula SAE. Mestre, Universidade Nova de Lisboa.

CRANKSHAFT. (2018). "FEM for Trusses (Finite Element Method) Part 1." Retrieved 21/05, 2019, from <http://what-when-how.com/the-finite-element-method/fem-for-trusses-finite-element-method-part-1/>.

CRANKSHAFT. (2018). "FEM for Two-Dimensional Solids (Finite Element Method) Part 1." Retrieved 21/05, 2019, from <http://what-when-how.com/the-finite-element-method/fem-for-two-dimensional-solids-finite-element-method-part-1/>.

Davis, J. (2014). "Time History Analysis Of 2D Frame Using MATLAB (El Centro)." from <https://www.eng-tips.com/viewthread.cfm?qid=373023>.

Delado, M. (2010). Sistemas Eléctricos Trifásicos: a Média, Alta e Muito Alta Tensão. Porto, Publindustria, Edições Técnicas.

Diamantino, P. (2014). SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO METÁLICA. Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Dicker Jr., J. J., G. R. Pennocke, E. Shigley (2003). Theory of Machines and Mechanisms. Oxford, OXFORD UNIVERSITY PRESS.

Dickerson, T. (2001). "MODELLING OF ADHESIVELY BONDED JOINTS." Retrieved 03/06, 2019, from <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/modelling-of-adhesively-bonded-joints-april-2001>.

EFACEC. "Transformadores." Retrieved 21/05, 2019, from <https://www.efacec.pt/transformadores-potencia-distribuicao-oleo-secos/>.

Efacec. (2019). "Press Kit." Retrieved 10/07, 2019, from <https://www.efacec.pt/press-kit-comunicados-imprensa/>.

FERRAMENTAS. (2018). "Compressor 290L 4HP Rubete 380PTSBD." Retrieved 20/04, 2019, from https://ferramentas.pt/compressor-rubete-380ptsbd-290-litros-4hp-400v.html?utm_source=googleshopping&utm_medium=cpc&utm_campaign=googleshopping&gclid=Cj0KCQjwhuvlBRCEARIsAM720HqJwIKCpDs4euo0fVG9EgNvNWcwLl0Dpz1rvPWJGMq8LcZnSKCHYYkaAnUiEALw_wcB.

Ferreira, A. J. M. (2009). MATLAB codes for Finite Element Analysis: solids and structures. Berlim, Alemanha, Springer Scicllcc+Busincss Mcdill B.V. .

FESTO. (2018). "2018 Focus Product Brochure." Retrieved 20/04, 2019, from <https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/493161/2018%20Focus%20Product%20Brochure.pdf>.

Fialho, A. B. (2003). Automação Pneumática. São Paulo, Editora Érica Ltda.

Fialho, A. B. (2006). Automação Hidráulica: Projetos, Dimensionamento e Análise de circuitos. São Paulo, Editora Ética Ltda.

Fonseca, E. (2018). Apontamentos Construções Metálicas, Instituto Superior de Engenharia do Porto.

GALOMS. (2014). "Transformers." Retrieved 01/08, 2019, from <https://shreyankmauria2013.wordpress.com/2014/01/18/transformers/>.

Guedes, M. V. (1995). "Máquinas Elétricas: Núcleo do Transformador." Retrieved 01/05, 2019, from https://paginas.fe.up.pt/maquel/RH/Res_Hist-09.pdf.

Hibbeler, R. C. (2010). Estática: Mecânica para Engenharia. São Paulo, Brasil, Pearson Education.

INDUBRAS. "Relé Detector de Gás tipo Buchholz." Retrieved 21/05, 2019, from <http://www.indubras.com.br/rele-detector-de-gas-tipo-buchholz.html>.

INFOESCOLA. (2006). "Fusível." Retrieved 24/04, 2019, from <https://www.infoescola.com/eletricidade/fusivel/>.

JULAR. (2018). "ESTRUTURAS EM MADEIRA." Retrieved 21/05, 2019, from <https://www.jular.pt/produtos/estruturas-em-madeira>.

KALATEC. (2018). "O que é uma guia linear?" Retrieved 18/05, 2019, from <https://www.kalatec.com.br/o-que-e-uma-guia-linear/>.

Kostenko, M.eL. Piotrovski (1979). Máquinas Elétricas, Lopes Da Silva Editora.

Krause, P., O. WasynczukeS. Pekarek (2012). Electromechanical Motion Devices. New Jersey, EUA, JOHN WILEY & SONS, INC.

LEARNEASY. (2018). "Combined Stresses." Retrieved 16/04, 2019, from <http://www.learneasy.info/MDME/MEMmods/MEM09155A-CAE/070-Combined-Stresses/Combined-Stresses.html>.

Leonhardt, F.eE. Monnig (1977). Construções de CONcreto. Rio de Janeiro, Brasil, Livraria Interciência, Ltda.

Logan, D. L. (2007). A first course in the finite element method, Cengage Learning.

Lotti, R. S., A. Machado, E. MazzeiroeJ. Júnior. (2006). "Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos " Retrieved 15/05, 2019, from <http://www.scielo.br/pdf/dpress/v11n2/a06v11n2>.

Lyshevski, S. E. (2000). Electromechanical Systems, Electric Machines and Applied Mechatronics. Florida, EUA, CRC Press LLC.

MACHININGNEWS. (2015). "New SKF lube element extends operating life for LLT profile rail guides." Retrieved 29/05, 2019.

Maciel, R. (2013). Método dos elementos finitos aplicado à análise de sólidos: concepção e implementação. Mestre, Universidade Técnica de Lisboa.

Mandim, A. (2013). ESTUDO E PARAMETRIZAÇÃO DAS PRINCIPAIS PROTEÇÕES ELÉTRICAS DE GERADORES E TRANSFORMADORES DE GRUPO DE UMA CENTRAL HIDROELÉTRICA, Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Medeiros, R. P. (2014). Proteção Diferencial de Transformadores de Potência Utilizando a Transformada Wavelet, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Modenesi, P., P. MarqueseD. Santos (2012). Introdução à Metalurgia da Soldagem, Universidade Federal de Minas Gerais.

Montenegro, R. (2016). "Disjuntores a óleo." Retrieved 12/05, 2019, from <https://universoeletrico.wordpress.com/2016/08/13/disjuntores-a-oleo/>.

- Morais, S. (2006). "Desenho técnico básico 3." Porto Editora.
- NPTel. (2018). "Module 5: FEM for Two and Three Dimensional Solids Lecture 6: Axisymmetric Element ", from <https://nptel.ac.in/courses/105105041/m5l29.pdf>.
- O'Brien, A. (1991). Welding Processes, volume 2. Miami, EUA, American Welding Society.
- Parr, A. (1998). Hydarulics and Pneumatics: A technician's and engineer's guide. Oxford, Elsevier.
- Patial, A. (2018). "How to Break Into the Green Energy Business." Retrieved 12/05, 2019, from <https://urjanomics.com/1311-how-to-break-into-the-green-energy-business.html>.
- Penedos, J. (2006). A Energia em Portugal: A perspectiva de quem a utiliza, Associação Portuguesa da ENergia.
- Pocius, A. V. (2012). Adhesion and Adhesives Technology. Munich, Hanser Publications.
- PSU. (2018). "Global Energy Demand and Consumption." Retrieved 17/05, 2019, from <https://www.e-education.psu.edu/geog438w/node/376>.
- QUALITROL. (2018). "Relés de Elevação Súbita de Pressão (RPRR) 900/910 Qualitrol." Retrieved 21/05, 2019, from <https://www.qualitrolcorp.com.br/products/pressure-controls-gauges-and-relays/rapid-pressure-rise-relays/qualitrol-900-910/>.
- Rao, S. S. (2010). The Finite Element Method in Engineering, Elsevier, Inc.
- Reddy, J. N. (1993). Introduction to the Finite Element Method, McGraw-Hill, Inc.
- REIMAN. (2018). "Motor eléctrico trifásico 11KW 6P B3 160L IE2." Retrieved 12/05, 2019, from <http://www.reiman.pt/index.php?id=5&pid=17023>.
- REINHAUSEN. (2018). "BUCHHOLZ-RELAY – PROTECTION SYSTEM MESSKO® MSAFE® FOR TRANSFORMERS." Retrieved 12/05, 2019, from https://www.reinhausen.com/desktopdefault.aspx/tabid-1350/1569_read-3909/.
- REINHAUSEN. (2018). "OILTAP® MS." Retrieved 21/05, 2019, from https://www.reinhausen.com/en/desktopdefault.aspx/tabid-305/78_read-227/.
- REINHAUSEN. (2018). "VACUTAP® VM®." Retrieved 21/05, 2019, from https://www.reinhausen.com/en/desktopdefault.aspx/tabid-1021/260_read-4856/.
- Ribeiro, A. (2019). "Redes de distribuição de energia eléctrica." Retrieved 03/05, 2019, from <https://alunosonline.uol.com.br/geografia/redes-distribuicao-energia-eletrica-no-brasil.html>.
- S&C. (2004). "S&C's Trans-Rupter II® Transformer Protector: Affordable sophisticated transformer protection." Retrieved 29/05, 2019, from <https://www.sandc.com/globalassets/sac-electric/documents/sharepoint/documents--all-documents/descriptive-bulletin-731-30.pdf>.
- S&C. (2019). "Substation Switching and Protection Products and Services : Trans-Rupter II® Transformer Protectors." Retrieved 10/07, 2019, from <https://www.ebm.co.za/index.php/product-categories/cutters/trans-rupter-ii-transformer-protectors-detail?tmpl=component&format=pdf>.
- S&C, E. C. (2018). "Protetor de Transformador Trans-Rupter II®." Retrieved 11/02, 2019, from <https://www.sandc.com/pt/produtos-e-servicos/produtos/protetor-de-transformador-trans-rupter-ii/>.
- Santiago, A. (2017). Manual de Dimensionamento de Estruturas em Aço Inoxidável. Coimbra, Portugal, CMM.

- Santos, A. A.eA. F. Silva (2014). Automação Pneumática. Porto, Portugal, Publindústira, Edições Técnicas.
- Santos, J. F. O.eL. Quintino (1998). Processos de Soldadura. Oeiras, Portugal, Insitituto de Soldadura e Qualidade.
- Santos, P. M. M. (2015). Projeto mecânico de equipamento parafabrico automatizado de vestuário. Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto16 de outubro de 2015.
- Silva, A. F.eA. A. Santos (2016). Automação Óleo-Hidráulica: principios de funcionamento. Porto, Portugal, Publindústria, Edições Técnicas.
- Silva, C. V. C. (2017). Planeamento de uma rede de distribuição num contexto de Smart Grid. Mestrado, Insitituto Superior de Engenharia do Porto.
- Silva, F. J. G. (2016). Tecnologia da Soldadura, Publidústria, Edições Técnicas, Lda.
- Silva, L. F. M., A. G. MagalhãesM. F. S. F. Moura (2007). Juntas Adesivas Estruturais. Porto, Portugal, Publindústria, Edições Técnicas.
- Silva, L. S. S., A. (2003). Manual de Ligações Metálicas.
- Simões, R. A. D. (2014). Manual de dimensionamento de estruturas metálicas, CMM- Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.
- SIMULEON. (2018). "SIMULIA XFlow CFD." Retrieved 16/04, 2019, from <https://www.simuleon.com/simulia-xflow-cfd/>.
- Solé, A. C. (2007). Neumática e Hidráulica. Espanha, MARCOMBO, S.A.:
- Tawfik, M. (2015). "FEM: Beams." from <https://www.slideshare.net/mohammadtawfik/fem-beams>.
- Tengfei, T.eZ. Jun (2018). "Conceptual design and kinetostatic analysis of a modular parallel kinematic machine-based hybrid machine tool for large aeronautic components." Robotics and Computer Integrated Manufacturing.
- UNIDOMAF. (2018). "Bronze CB3." Retrieved 23/07, 2019, from http://www.unidomaf.pt/index.php?id_product=858&controller=product.
- VIVOEXPORT. (2016). "Power and Energy." Retrieved 23/05, 2019, from <https://vivoexport.pt/solutions/power-energy/>.
- Whelan, M., J. Harnden Jr.eT. Blalock. (2014). "Lightning and Fault Suppression." Retrieved 12/05, 2019, from <http://edisontechcenter.org/LightningSuppression.html>.
- Winders Jr., J. J. (2002). Power Transformers Principles and Applications. New York, U.S.A., Marcel Dekker, Inc.

ANEXOS

6.1 Desenhos Técnicos

6 ANEXOS


6.1 Desenhos Técnicos

6.1.1 Planos de Fabrico


6.1.2 Planos de Montagem

6.2 Fichas Técnicas

6.2.1 Nook Industries Bevel Jack

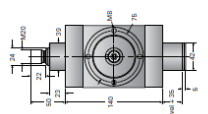


G1-BSJ

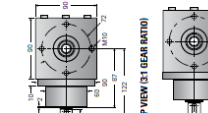


BEVEL GEAR JACKS

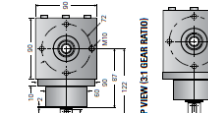
G1-BSJ-U UPRIGHT



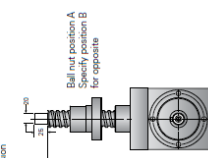
G1-BSJ-TOP VIEW (21 GEAR BATIO)




G1-BSJ-TOP VIEW (31 GEAR BATIO)



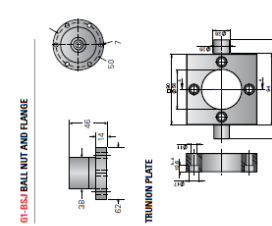
G1-BSJ-UR UPRIGHT ROTATING
 Lifting capacity "E" dimension
 Unit: 100kg = 220lb



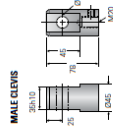
G1-BSJ-UK KEYS



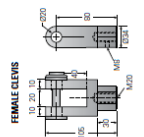
G1-BSJ BALL NUT AND FLANGE



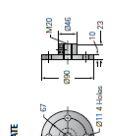
MALE CLEVIS



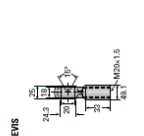
FEMALE CLEVIS



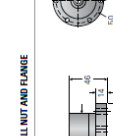
TOP PLATE



RUD EYE CLEVIS



TRUSS PLATE



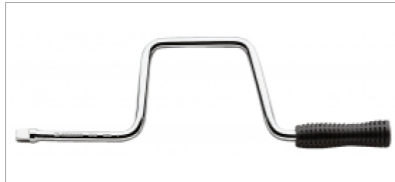
Screw Specs:
 Screw Dia: 25 mm
 Start Torque = 1.5 x Raising Torque
 Approximate weight (kg)
 Per Jack: 0.122
 Grease: 0.22

Caution: Jack is self-lowering. Lifting screw must be secured to prevent rotation for non-keyed units.

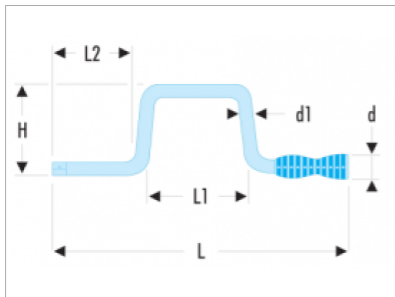
NOOK BEVEL GEAR JACKS


nookindustries.com

6.2.2 FACOM MANIVELA 1/2"

**MANIVELA 1/2"****Designação :**

- O acessório que permite a maior rapidez de manobra sempre que a sua utilização é possível.
- Punho giratório em PVC.
- Apresentação: cromado polido.

**Referências :**

	d [mm]	d1 [mm]	H [mm]	L [mm]	L1 [mm]	L2 [mm]	[g]
S.110	29	12	115	402	130	130	510

6.2.3 FACOM S.H - CHAVES DE CAIXA 1/2" SEXTAVADAS MÉTRICAS | S.31H



S.H - CHAVES DE CAIXA 1/2" SEXTAVADAS MÉTRICAS | S.31H

**Designação**

- Perfil OGV®: mais potência e segurança, preserva o sextavado das porcas.
- Apresentação: cromado polido.

Informações

A [mm]	31
d [mm]	34,2
d1 [mm]	41,6
L [mm]	44
L1 [mm]	20,0
[g]	205

