

• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

AValiação Numérica do Comportamento Estrutural da Bancada de um Elevador

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Projecto Mecânico

Autor

Luís António Henriques Silva

Orientador

Professora Doutora Maria Augusta Neto

Co-orientador

Professor Doutor Luís Manuel Roseiro

Júri

Presidente Professora Doutora Marta Oliveira
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professora Doutora Marta Oliveira
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Professor Doutor Rogério Augusto P. Leal
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Janeiro de 2010

Quando penso em algo, prefiro fazê-lo do que pensar o resto da vida: e se eu
tivesse feito?

À minha mulher, Susana, que sempre me apoia e incentiva nos meus
projectos.

Aos meus filhos, Henrique e Afonso.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento:

Prof^a. Dr^a. Maria Augusta Neto

Prof. Dr. Luís Manuel Roseiro

Sempre mostraram a maior disponibilidade e atenção para me auxiliarem a lidar com os programas informáticos de simulação, que eram ferramentas praticamente desconhecidas para mim até este trabalho.

Resumo

Com este trabalho, pretende-se estudar numericamente a estrutura suporte de um elevador sem casa de máquinas fabricado pela Empresa “Elevadores Padrão, Lda”. As especificações técnicas são tidas em conta de acordo com a Norma Portuguesa NP EN 81-1:2000.

Enquadra-se a utilização da estrutura de suporte do elevador e a definição do modelo de elementos finitos a considerar. A simulação numérica é feita com dois programas de cálculo: o Solidworks Simulation e o Patran/Nastran. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos, permitindo verificar que a estrutura respeita as considerações da Norma Portuguesa.

Palavras-chave: Estruturas Mecânicas, Elementos.

Abstract

This work pretend to study if the support of an elevator machine made by “Padrão Elevadores, Lda.” is accomplishes with the norm NP EN 81-1:2000.

At the introduction it is explained some practical details to considerer when applying the Finite Element Method. There will be used two programs to calculate the tensions and displacements: Solidworks Simulation and Patran/Nastran. In order to obtain results from different ways, it will be made tests with the structure made by solid elements, shell elements and a combination of both.

The results obtained by the different ways will be analysed and experimentally compared in order to know about the best method to apply to this study.

Keywords: Mechanical Structures, Finite Elements.

Índice Geral

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	vii
Índice de Gráficos.....	viii
Simbologia e Siglas	ix
Simbologia.....	ix
Siglas	ix
1. Introdução.....	1
2. Elevador sem casa de máquinas	2
2.1. Descrição da instalação	2
2.2. Cargas	4
2.3. Caso em estudo.....	4
2.4. Material utilizado.....	5
3. Normas aplicáveis.....	6
4. Estudo numérico	7
4.1. Tipos de elemento.....	7
4.2. Caso de uma Viga Encastrada Livre.....	10
5. Estudo com elementos sólidos.....	12
5.1. Fixações.....	12
5.2. Uniões.....	13
5.3. Forças exteriores.....	13
5.4. Contactos entre os conjuntos	14
5.5. Resultados dos ensaios	15
5.6. Estudo nas ligações às guias.....	21
5.7. Estudo na estrutura superior	23
5.7.1. Ensaios com elementos sólidos parabólicos.....	27
5.7.2. Ensaios com elementos sólidos lineares.....	27
6. Estudo com elementos casca	28
7. Estudo com elementos mistos (sólidos e de casca)	30
8. Resumo dos ensaios realizados.....	35
9. Conclusões.....	38
10. Referências bibliográficas	41
11. Anexo 1.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Suporte e máquina eléctrica montada no suporte.....	3
Figura 2 - Máquina e suporte fixados às guias	3
Figura 3 - Suporte completo do elevador	5
Figura 4 – Elemento sólido linear e Elemento sólido parabólico.....	8
Figura 5 - Elemento triangular linear e Elemento triangular parabólico.....	9
Figura 6 - Distribuição de tensões	11
Figura 7 - Distribuição de deslocamentos	11
Figura 8 - Fixação da estrutura.....	12
Figura 9 - Fixação dos conjuntos.....	13
Figura 10 - Aplicação da força na placa da máquina	14
Figura 11 - Contactos “no penetration”	14
Figura 12 - Distribuição de tensões com malha de elementos com 15mm, sólidos, “high”	16
Figura 13 - Localização do deslocamento máximo com malha de elementos com 15mm, sólidos, “high”	16
Figura 14 - Distribuição de tensões com malha de 12mm e elementos sólidos “draft”	17
Figura 15 - Localização do deslocamento máximo com malha 12mm e elementos sólidos “draft”	18
Figura 16 - Distribuição de tensões no conjunto completo	20
Figura 17 - Distribuição de tensões no conjunto superior	21
Figura 18 - Distribuição de tensões na fixação às guias.....	22
Figura 19 - Distribuição de tensões com menos uma fixação	23
Figura 20 - Distribuição de tensões na união dos conjuntos	24
Figura 21 - Tensões com montagem apoiada nas arestas exteriores	25
Figura 22 - Deslocamentos com montagem apoiada nas arestas exteriores.....	25
Figura 23 - Tensões com montagem fixada nas superfícies laterais inferiores.....	26
Figura 24 - Deslocamentos com montagem fixada nas superfícies laterais inferiores.....	26
Figura 25 - Distribuição de tensões na montagem com conjuntos unitários de elementos casca.....	28
Figura 26 - Distribuição de tensões na montagem com conjuntos individuais de elementos casca.....	29
Figura 27 - Distribuição de deslocamentos na montagem com conjuntos unitários de elementos casca	29
Figura 28 - Distribuição de deslocamentos na montagem com conjuntos individuais de elementos casca	29
Figura 29 - Distribuição de tensões com elementos lineares, mistos e com placa da máquina com elementos casca.....	31
Figura 30 - Distribuição de deslocamentos com elementos lineares, mistos e com placa da máquina com elementos casca.....	32
Figura 31 - Distribuição de tensões com elementos lineares, mistos e com placa da máquina com elementos sólidos	33
Figura 32 - Distribuição de deslocamentos com elementos lineares, mistos e com placa da máquina com elementos sólidos.....	33
Figura 33 - Distribuição de tensões com elementos parabólicos, mistos e com placa da máquina com elementos sólidos	34

Figura 34 - Distribuição de deslocamentos com elementos parabólicos, mistos e com placa da máquina com elementos sólidos 34

Figura 35 - Distribuição de tensões superiores a 195 MPa, com elementos sólidos “high”, com 9mm de dimensão 38

Figura 36 – Pormenor da vista da concentração de tensões da figura 35 39

Figura 37-Distribuição de tensões superiores a 195 MPa, com elementos mistos “high”, com 18mm de dimensão e com a placa da máquina de elementos sólidos 39

Figura 38 – Vista em pormenor das tensões na zona do furo 40

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Pesos dos componentes	4
Tabela 2 - Propriedades do material utilizado	6
Tabela 3 - Coeficientes de segurança a utilizar no projecto de elevadores, Norma NP EN 81-1:2000.....	7
Tabela 4 - Tensões de projecto admissíveis σ_{perm}	7
Tabela 5 - Tabela de resultados	10
Tabela 6 - Valores obtidos nos ensaios com elementos sólidos “high”	15
Tabela 7 - Valores obtidos nos ensaios com elementos sólidos “draft”	17
Tabela 8 - Valores obtidos nos ensaios com refinamento das soldaduras.....	20
Tabela 9 - Valores obtidos nos ensaios na estrutura superior e com elementos “high”	27
Tabela 10 - Valores obtidos nos ensaios na estrutura superior e com elementos “draft”	27
Tabela 11 - Resultados obtidos com elementos lineares, mistos e placa da máquina em elementos casca	31
Tabela 12 - Resultados obtidos com elementos lineares, mistos e placa da máquina em elementos sólidos.....	32
Tabela 13 - Resultados obtidos com elementos parabólicos, mistos e placa da máquina em elementos sólidos.....	34
Tabela 14 - Resumo dos resultados obtidos na estrutura superior	35

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tensão máxima no conjunto completo	18
Gráfico 2 - Tensão máxima no conjunto superior	19
Gráfico 3 - Deslocamento máximo nos ensaios	19
Gráfico 4 - Resultados obtidos com diversos tipos de elementos	37

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

N/mm^2 – Unidade de pressão, equivalente a MPa

MPa – Unidade de pressão Megapascal, equivalente a N/mm^2

N – Unidade de força, Newton

mm – Unidade de medida, milímetro

Kg – Unidade de peso, kilograma

J – Unidade de temperatura, Joules

N/A – Não aplicável

σ_{perm} - Tensão admissível em N/mm^2

R_m - Resistência à tracção em N/mm^2

S_t - Coeficiente de segurança

X, Y, Z – Eixos ortogonais

Draft – Elemento sólido com 4 nós ou elemento de casca com 3 nós

High - Elemento sólido com 10 nós ou elemento de casca com 6 nós

Siglas

MEF – Método de Elementos Finitos

SOLIDWORKS – Programa informático

PATRAN – Programa informático

NASTRAN – Programa informático

UC – Universidade de Coimbra

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

1. INTRODUÇÃO

A indústria de construção de elevadores, apesar de pouco conhecida, tem elevada importância no contexto económico dado que poderá contribuir de modo importante para o aumento da produtividade em Portugal. A Elevadores Padrão Lda., situada na Lousã, é uma empresa que produz e instala anualmente um número significativo de elevadores e monta-cargas, tendo evoluído recentemente para o elevador sem casa de máquinas. Neste tipo de elevador, uma única estrutura de suporte sustenta a máquina de tracção dos cabos, a cabine e o contrapeso do sistema mecânico.

Este trabalho, pretende estudar numericamente a estrutura suporte do elevador e verificar se esta cumpre ou supera o determinado pela norma portuguesa Norma NP EN 81-1:2000, aplicável a elevadores eléctricos.

Para a análise numérica da bancada optou-se pelo método dos elementos finitos (MEF). De facto, o MEF permite o dimensionamento de peças individuais ou conjuntos de peças de modo bastante eficiente. A abordagem pelo MEF consiste em modelar um sistema, no nosso caso a estrutura de suporte do elevador, através da decomposição do domínio em partes discretas menores (elemento finito), para a qual é possível descrever matematicamente o seu comportamento. As interligações entre os elementos finitos que constituem o domínio discreto são feitas através de “nós”. Assim, os elementos finitos são caracterizados pelo número de nós geométricos e pelo grau de aproximação matemática que contêm. Os elementos finitos que constituem a malha do domínio em estudo não têm de ser necessariamente iguais em tamanho ou tipo. Contudo, devem representar da melhor maneira possível a geometria do domínio em análise. Regra geral, nas regiões onde se tenha um maior interesse ou se espera uma maior variação da grandeza em estudo, deve concentrar-se um maior número de elementos.

O processo de divisão da geometria em elementos é designado por malhagem. A qualidade da malha é importante para a precisão dos resultados. Numa malha de boa qualidade, os elementos devem ser o mais equilibrado possível. Em termos teóricos, quanto menor o elemento, melhor será a solução numérica. No entanto, o esforço computacional necessário aumenta. É por isso necessário estabelecer um compromisso entre o tipo e dimensão do elemento a utilizar e o esforço computacional disponível para efectuar o cálculo.

Neste trabalho a aplicação do método dos elementos finitos é feita com recurso a dois programas de cálculo, o Solidworks Simulation e o Patran/Nastran. No caso do Patran, apenas será utilizado como exemplo na realização de um caso teórico simples. É feita uma análise estática linear da estrutura, sendo utilizados na discretização elementos sólidos, elementos do tipo casca e uma combinação dos dois (malha mista).

2. ELEVADOR SEM CASA DE MÁQUINAS

O tipo de elevador abordado neste trabalho diferencia-se dos modelos com casa de máquinas por não necessitar de uma divisão num piso superior, com todos os custos adicionais que tal representa: um piso, paredes, porta e acesso. Num elevador sem casa de máquinas toda a estrutura, quadros de comando e máquinas ficam instalados na caixa do elevador. A fixação da máquina é feita numa estrutura superior que serve também de suporte à cabine, cabos e contrapeso. Esta estrutura é suportada pelas guias existentes ao longo da caixa.

2.1. Descrição da instalação

O suporte do elevador é constituído por um conjunto de 5 peças e cada conjunto é constituído individualmente, por chapas e perfis unidos por cordões de soldadura. A ligação entre os 5 conjuntos é assegurada por parafusos, anilhas e porcas. O suporte completo (5 conjuntos) é fixo com parafusos às guias montadas na caixa do elevador. O amortecimento das vibrações transmitidas entre o conjunto superior e as guias é feito com a montagem de duas placas de borracha entre as mesmas.

Na Figura 1 e na Figura 2 são esquematizadas as montagens da máquina no suporte e a fixação deste às guias existentes na caixa do elevador, respectivamente.

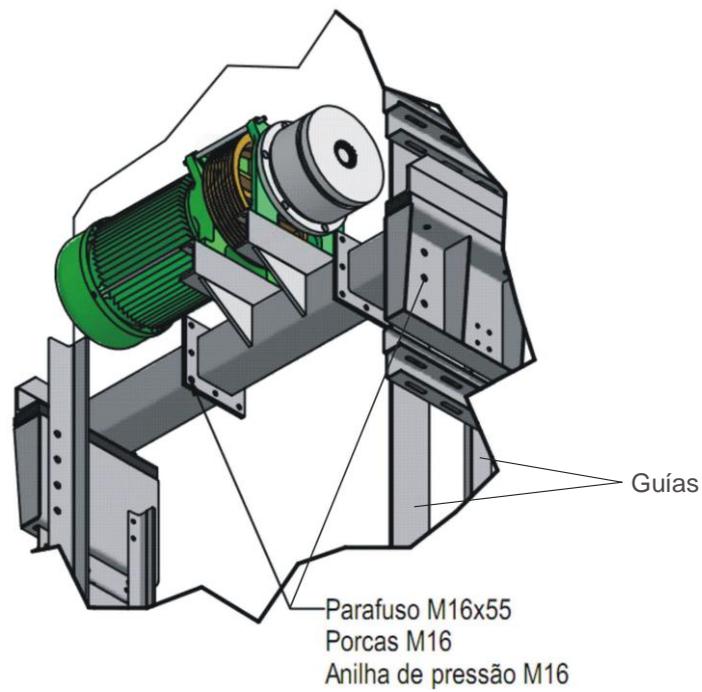


Figura 1 – Suporte e máquina eléctrica montada no suporte

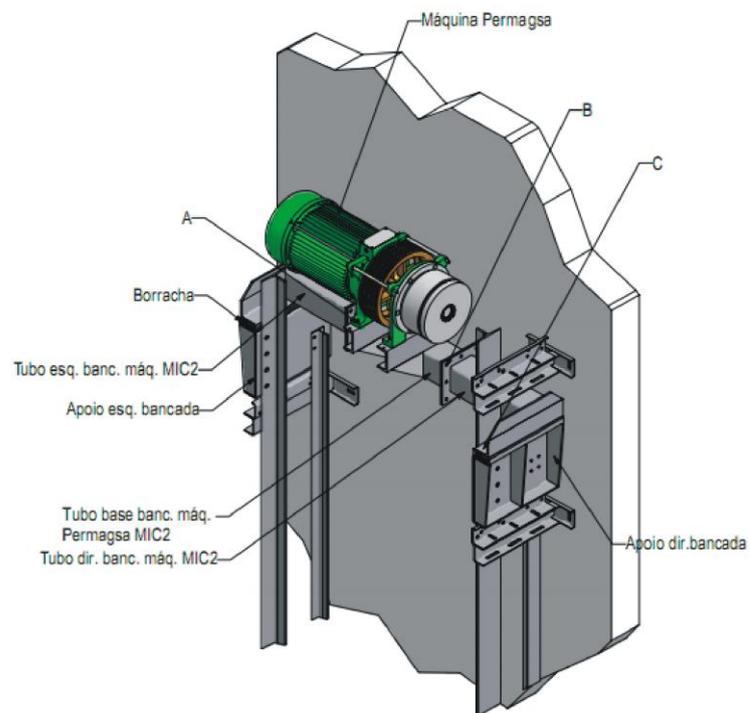


Figura 2 - Máquina e suporte fixados às guias

2.2. Cargas

A solicitação externa do conjunto foi obtida considerando uma lotação máxima de 6 pessoas, Os dados da Tabela 1, fornecidos pela empresa, mostram os pesos que intervêm em todo o sistema mecânico do elevador. No caso da estrutura de suporte, e atendendo a que os cabos se dividem para a cabine e para o contrapeso, é a totalidade destes valores que solicita a estrutura. No caso em análise considera-se um peso total de 20000N.

<i>Cabine para 6 pessoas</i>	[Kg]	
	mínimo	máximo
cabina	243	328
chassis	116	116
porta	74	148
acessórios	13	13
fita de manobra	7	28
limitador de velocidade	11	11
timonaria	5	5
total da carga - P	469	649
carga nominal - Q	480	480
P+Q	949	1129
contrapeso (P+Q/2)	709	889
total	1658	2018

Tabela 1 - Pesos dos componentes

2.3. Caso em estudo

O conjunto de peças representado na Figura 3 constitui o suporte do elevador em estudo neste trabalho. Nesta estrutura será aplicada uma carga C de 20000N distribuída numa chapa que é fixada aos perfis em U onde é montada a máquina do elevador. A chapa simula a actuação do motor. O conjunto formado pelas três peças principais, é fixo na estrutura de suporte por intermédio de parafusos. Os suportes são montados nas guias do elevador por intermédio de 24 parafusos como se pode observar na Figura 1. O modelo geométrico para este estudo foi criado em “Solidworks 2010”.

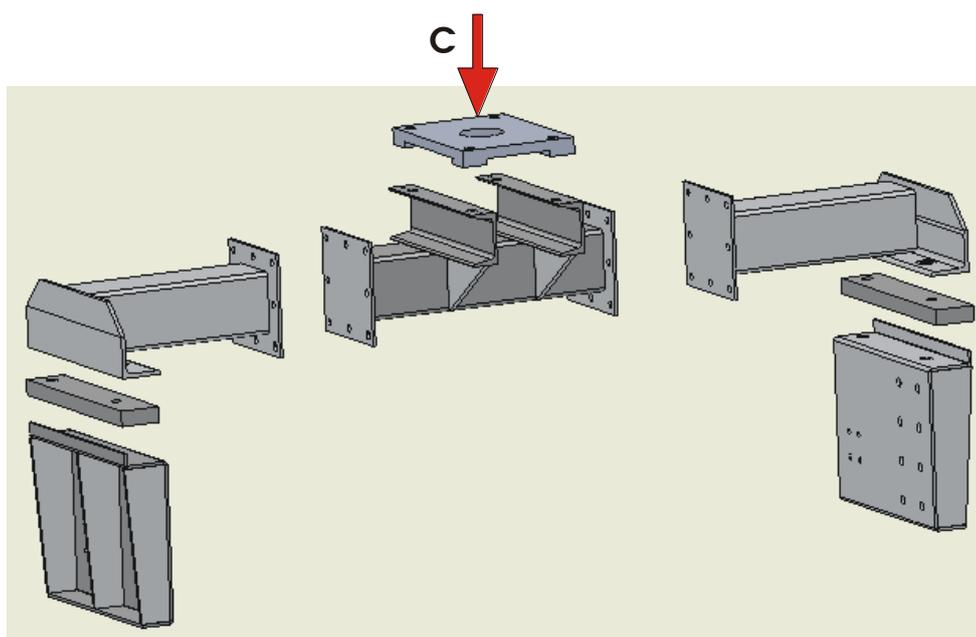


Figura 3 - Suporte completo do elevador

Atendendo a que não são conhecidas as propriedades da borracha utilizada na ligação da estrutura de suporte da máquina do elevador à base de fixação, na definição das condições de fronteira foram consideradas algumas alterações. Numa primeira abordagem, as duas chapas de borracha foram consideradas como sendo rígidas e construídas no mesmo material que os restantes componentes.

2.4. Material utilizado

Na Tabela 2 são apresentadas as propriedades do aço utilizado na construção (S 235 JR). Este material corresponde à chapa de 6mm de espessura onde são apertados os parafusos, anilhas e porcas que fixam o suporte da máquina do elevador. Os restantes materiais empregues na construção, nomeadamente tubos e perfis, possuem propriedades com valores que superam as propriedades mecânicas da chapa.

Aço – S 235 JR		
Propriedades	Valor	Unidades
Módulo de Young	210000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.30	N/A
Tensão de rotura	360-520	N/mm ²
Tensão de cedência (min)	235	N/mm ²

Densidade	7850	Kg/m ³
Alongamento à rotura	26	%

Tabela 2 - Propriedades do material utilizado

3. NORMAS APLICÁVEIS

A bancada do elevador deverá garantir os requisitos de construção que são definidos na Norma NP EN 81-1:2000 apresentada no Anexo I. Esta norma estabelece as “*Regras de segurança para o fabrico e instalação de elevadores*”. Neste contexto, os valores obtidos para a tensão máxima deverão superar os valores para a tensão admissível determinada pela expressão seguinte:

$$\sigma_{perm} = \frac{R_m}{S_t}$$

Em que

σ_{perm} é a tensão admissível em N/mm².

R_m é a resistência à tracção em N/mm².

S_t é o coeficiente de segurança que se indica na Tabela 3.

O coeficiente de segurança a utilizar no projecto de elevadores tem em conta as características mecânicas do material a utilizar na sua construção e as condições de serviço do mesmo. Em situações normais de carga, o coeficiente de segurança pode assumir valores entre 2,25 e 3,75. Em situações excepcionais de funcionamento, nomeadamente na situação de rotura do cabo de suspensão do elevador e conseqüente actuação do pára-quedas, os valores a utilizar variam entre 1,8 e 3.

Casos de carga	Alongamento (A)	Coefficiente de segurança
Carga em utilização normal	$A > 12\%$	2,25
	$8\% \leq A \leq 12\%$	3,75
Actuação de pára-queda	$A > 12\%$	1,8
	$8\% \leq A \leq 12\%$	3

Tabela 3 - Coeficientes de segurança a utilizar no projecto de elevadores, Norma NP EN 81-1:2000

O material utilizado na construção deste elevador, ver Tabela 2, possui um valor médio de tensão de rotura de 440 MPa e um alongamento de 26%. Por outro lado, atendendo a que a possível actuação do pára-queda não induz uma variação negativa da solicitação sobre a estrutura de suporte da máquina do elevador, considera-se o coeficiente de segurança igual a 2,25. Assim, tendo em conta a norma de construção NP EN 81-1:2000, as tensões de projecto admitidas no elevador em estudo são apresentadas na Tabela 4.

Casos de carga	R_m		
	370	440	520
Carga em utilização normal	165	195	230
Actuação do pára-queda	205	244	292

Tabela 4 - Tensões de projecto admissíveis σ_{perm}

4. ESTUDO NUMÉRICO

4.1. Tipos de elemento

Num estudo numérico utilizando o MEF, existem diversos tipos de elementos que se podem utilizar de acordo com as dimensões e formas das estruturas a analisar. No caso em estudo, foram feitas simulações com elementos sólidos de dois tipos:

- **Draft**, cada elemento tem a forma de um tetraedro linear e possui um nó em cada

vértice, ou seja, 4 nós por elemento.

- **High**, cada elemento tem 10 nós: 4 nós nos vértices e mais um nó no meio de cada aresta (6 nós) do tetraedro parabólico.

Os elementos designados “draft” são do tipo linear, onde o deslocamento é aproximado por funções de forma de primeira ordem (Zienckiewicz, 2000). Um elemento parabólico também é designado por elemento de segunda ordem. Neste caso, o deslocamento é aproximado no interior do elemento por funções de forma do segundo grau. Na Figura 4 é apresentada a geometria e número de nós do elemento linear e do elemento parabólico.

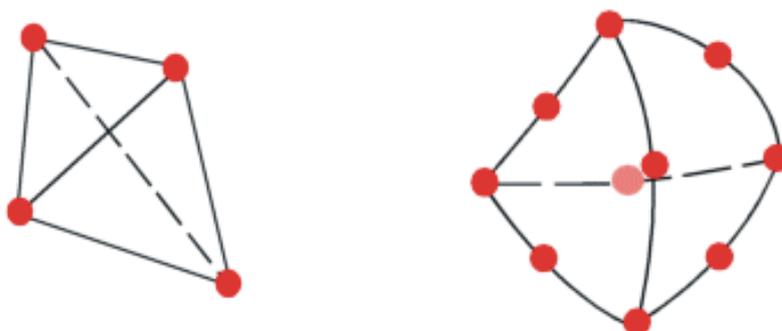


Figura 4 – Elemento sólido linear e Elemento sólido parabólico

Geralmente, para a mesma densidade de malha (número de elementos), os elementos parabólicos garantem melhor resultado que os elementos lineares porque representam fronteiras definidas com maior rigor e originam aproximações matemáticas de ordem superior. No entanto, computacionalmente requerem um esforço maior o que por vezes torna impraticável a sua aplicação.

Os elementos finitos sólidos permitem obter o campo de deslocamentos de um componente estrutural segundo três eixos ortogonais, X, Y e Z. Assim, cada nó tem três graus de liberdade que representam o movimento de translação na direcção de cada um dos eixos.

Existem muitas estruturas que devido às suas características geométricas não permitem a utilização de modelos simplificados de cálculo, nomeadamente a utilização de elementos finitos uni e bidimensionais. Por exemplo, existem componentes estruturais com variações de espessura difíceis de modelar utilizando elementos finitos de viga/placa. Contudo, os componentes mecânicos que constituem o sistema em análise são, essencialmente, do tipo placa.

De notar que, perante componentes mecânicos de baixa espessura a utilização de elementos finitos do tipo sólido obriga à geração de uma malha de elementos finitos de elevada densidade. Assim, nestas situações, a modelação numérica utilizando o MEF pode ser facilitada se recorrermos aos elementos do tipo placa/casca. Quando se trabalha com elementos de casca (Figura 5), o software gera os seguintes tipos de elementos de acordo com a opção seleccionada:

- **Draft**, cada elemento tem a forma de um triângulo linear, com três arestas direitas e possui um nó em cada vértice, ou seja, 3 nós por elemento
- **High**, cada elemento tem três arestas parabólicas e 6 nós: 3 nós nos vértices e mais um nó no meio de cada aresta do triângulo parabólico.



Figura 5 - Elemento triangular linear e Elemento triangular parabólico

Nos elementos finitos do tipo placa/casca, cada nó na superfície tem 6 graus de liberdade: três de translação e três de rotação. Os graus de liberdade de translação estão associados ao movimento de translação na direcção de cada um dos eixos X, Y e Z. Os graus de liberdade rotacionais estão associados ao movimento de rotação em torno dos eixos de X, Y e Z.

No sentido de melhor compreender a diferença de resultados espectável entre os vários modelos numéricos utilizados na modelação estrutural, começamos por analisar a variação de resultados na modelação pelo MEF dum componente tipo do sistema em estudo. Neste contexto, a secção seguinte consiste na obtenção da solução numérica de uma placa, encastrada numa extremidade e solicitada com uma carga concentrada na extremidade livre, utilizando elementos sólidos e elementos finitos do tipo placa/casca.

4.2. Caso de uma Viga Encastrada Livre

Nesta secção, o MEF é utilizado para obter o deslocamento máximo e a tensão máxima de uma placa encastrada numa extremidade e solicitada na extremidade livre por uma carga concentrada. Os resultados numéricos são obtidos considerando elementos do tipo sólido e elementos finitos do tipo placa/casca. Finalmente, a solução numérica é comparada com a solução analítica.

Caso: viga em balanço, com L=500mm e secção 110x6mm.

Carga: 10N na extremidade livre.

Modelação: elementos Sólidos (linear e parabólico) e Casca (linear e parabólico).

Elemento Sólido: tetraedro com 4 nós (linear) e 10 nós (parabólico)

Elemento Casca: tetraedro com 3 nós (linear) e 6 nós (parabólico)

Dimensão do elemento: 3 e 6 mm

Resultados: U - Deslocamento transversal máximo
S - Tensão normal máxima na direcção do eixo da viga

		Sólido			
		Linear		Parabólico	
		3 mm	6 mm	3 mm	6 mm
	Teoria				
U - Solidworks	1,00	0,69	0,47	0,98	0,98
U - Patran	1,00	0,57	0,34	0,98	0,98
S - Solidworks	7,58	5,30	3,00	9,20	9,60
S - Patran	7,58	5,42	2,65	10,00	9,45

		Casca			
		Linear		Parabólico	
		3 mm	6 mm	3 mm	6 mm
	Teoria				
U - Solidworks	1,00	0,98	0,98	0,98	0,98
U - Patran	1,00	0,98	0,98	0,98	0,98
S - Solidworks	7,58	8,90	8,90	8,90	8,90
S - Patran	7,58	8,89	8,75	9,01	9,00

Tabela 5 - Tabela de resultados

Nos campos da Tabela 5 preenchidos a verde, verifica-se que os deslocamentos obtidos nos ensaios se encontram muito próximos dos valores obtidos teoricamente. No caso das tensões, os valores obtidos são bastante diferentes, pelo que não é possível definir desde já qual o tipo de elemento que iremos utilizar nos ensaios com a estrutura do nosso caso. As Figuras 6 e 7 mostram a distribuição de tensões e de deslocamentos obtidos graficamente no programa Patran/Nastran.

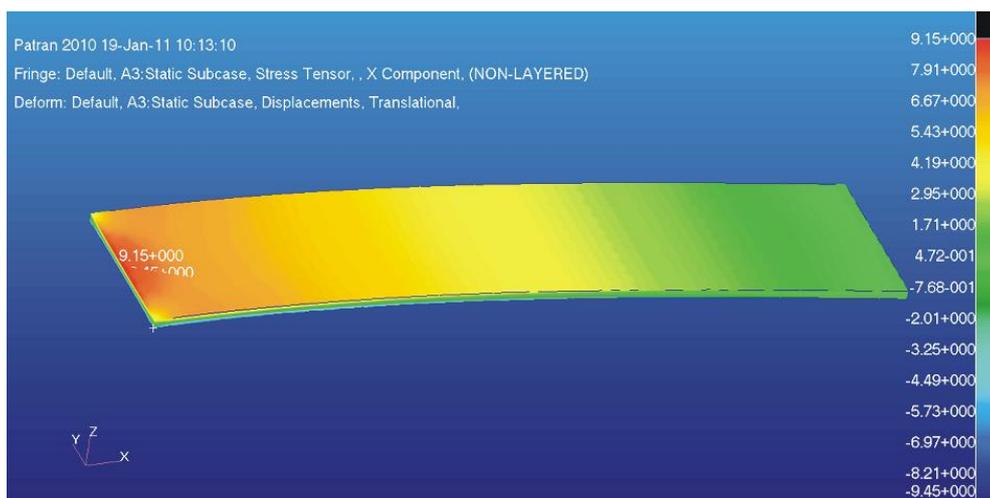


Figura 6 - Distribuição de tensões

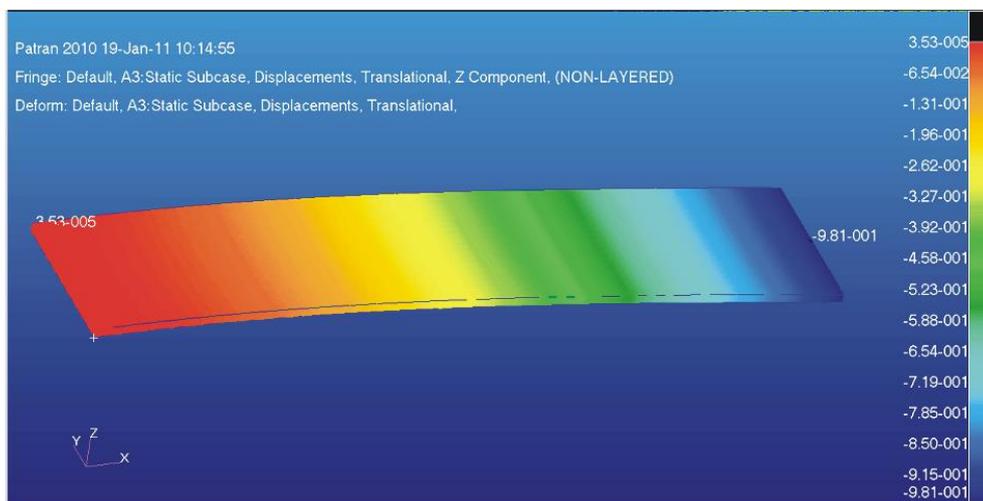


Figura 7 - Distribuição de deslocamentos

5. ESTUDO COM ELEMENTOS SÓLIDOS

A primeira abordagem ao conjunto que vai ser analisado neste trabalho foi efectuada com elementos sólidos. Serão feitos ensaios estáticos, que se caracterizam pelo facto da carga ser aplicada de forma gradual até atingir o valor pré-definido. Quando a carga máxima é alcançada, manter-se-á constante ao longo do tempo. A velocidade de arranque e de paragem é negligenciável, porque é controlada por um variador de frequência que torna praticamente nulo os acréscimos/decréscimos de velocidade existentes.

Ao longo deste capítulo será apresentado o resultado do estudo, mostrando todas as condições de fronteira, de carga, de contacto e de fixação que se adoptaram.

5.1. Fixações

A estrutura é fixa nos furos dos 24 parafusos com a opção “fixed geometry”, disponível no *SolidWorks Simulation*. Na

Figura 8 pode observar-se esta funcionalidade que restringe os movimentos da superfície nas três direcções.

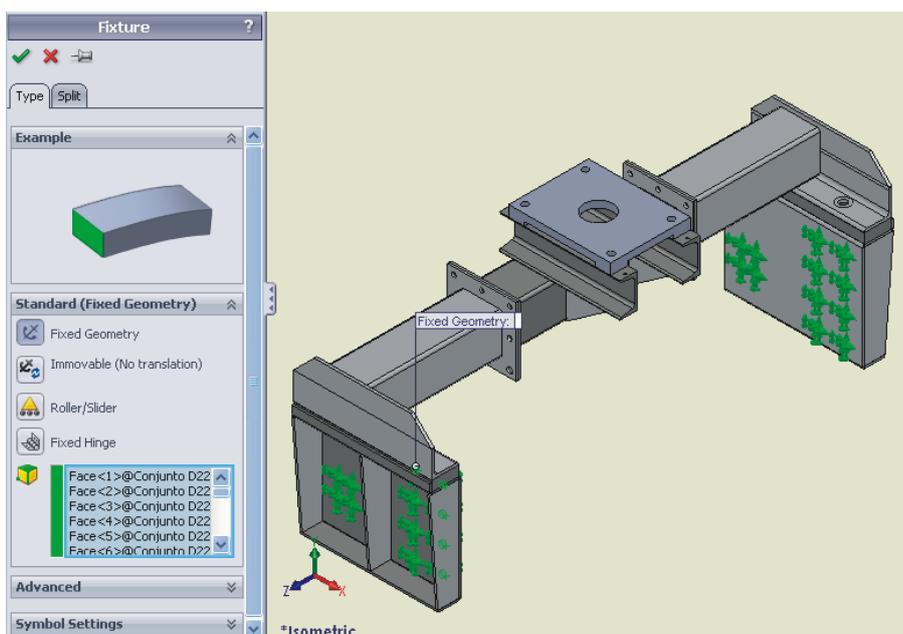


Figura 8 - Fixação da estrutura

5.2. Uniões

A ligação entre os diversos conjuntos é assegurada por intermédio de parafusos e porcas, ver

Figura 9. Na modelação, foram seleccionadas fixações do tipo “*bolt*” com um binário de aperto de 100Nm. Na prática, os operários ao fazerem a montagem não usam chaves dinamométricas, sendo o aperto efectuado sem o rigor do cálculo. O valor indicado corresponde ao vulgarmente aplicado no aperto das porcas das rodas de um automóvel. Na fixação da placa da máquina foram usadas fixações do tipo “*pin*” pois o perfil “U”, devido à inclinação que possui nas abas, não permite a utilização de parafusos.

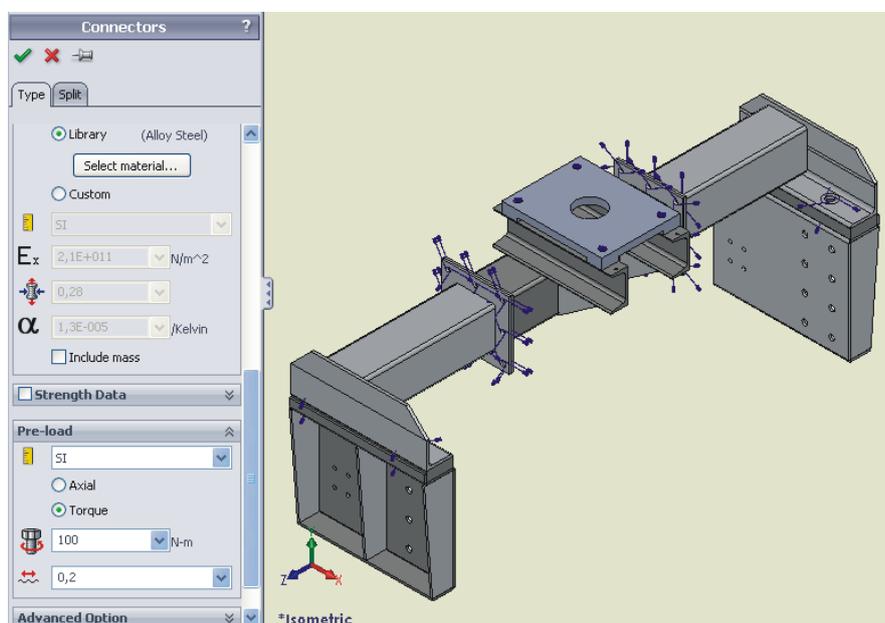


Figura 9 - Fixação dos conjuntos

5.3. Forças exteriores

Foi aplicada uma força de 20000N segundo uma direcção vertical e no sentido descendente. Ver Figura 10.

Embora a máquina esteja montada numa posição assimétrica relativamente ao apoio (ver Figura 1), o momento torçor que é originado pelo peso próprio é insignificante, pelo que foi negligenciado.

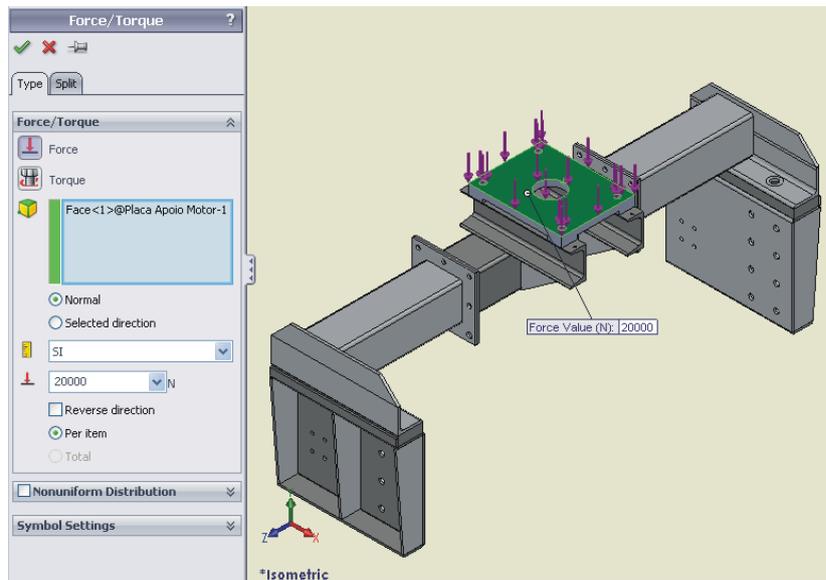


Figura 10 - Aplicação da força na placa da máquina

5.4. Contactos entre os conjuntos

O contacto global do conjunto foi considerado como “*bonded*”. Significa que os componentes em contacto actuam como se fossem um só (*colados-bonded*). Afim de poderem ser permitidos movimentos nas ligações com parafusos da montagem superior, foram particularizados três contactos, sendo definidos como “*no penetration*”. Ver Figura 11.

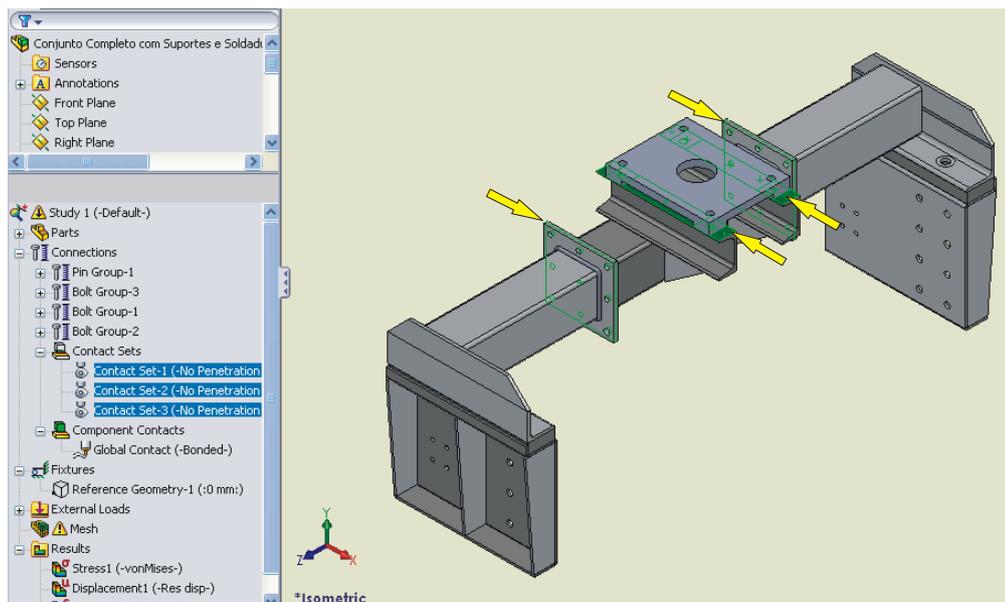


Figura 11 - Contactos “no penetration”

Num contacto do tipo “*no penetration*” a superfícies dos componentes em contacto não se inter-penetraram.

5.5. Resultados dos ensaios

No estudo de convergência da malha, os ensaios numéricos iniciais consideram uma malha com uma dimensão média do elemento finito de 30mm. Posteriormente, a dimensão média da malha foi diminuída até ao valor limitado pela capacidade computacional do computador utilizado para o efeito. Para cada um dos ensaios efectuados, foram extraídos os dados relativos à tensão máxima, deslocamento máximo, tipo de malha e valor da refinação da malha em pontos considerados críticos, nomeadamente nos cordões de soldadura existentes nos topos de cada conjunto. O deslocamento máximo representa o valor absoluto dos deslocamentos existentes nas três direcções x, y e z. Na Tabela 6 são apresentados os valores obtidos para a malha sólida com elementos “high”.

Ensaio	Dimensão do elemento (mm)	Tipo de malha	Nº de elementos	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima Von Mises (MPa) (1)	Tensão máxima Von Mises (MPa) (2)
1	30	high	22166	0,979	294,8	294,8
2	21	high	32042	1,017	226,4	226,4
3	18	high	40084	1,022	254,4	254,4
4	15	high	52589	1,050	265,6	265,6
5	12	high	79267	1,052	267,1	267,1

(1) - Valor máximo do conjunto completo (2) - Valor máximo do conjunto superior

Tabela 6 - Valores obtidos nos ensaios com elementos sólidos “high”

Para os ensaios em que foi considerada uma dimensão de malha inferior a 12mm, utilizando elementos “high”, tornou-se impossível chegar a valores concretos, ou por o programa bloquear ou porque ficava a calcular durante muitas horas, sem nunca atingir resultados. Na Figura 12 pode observar-se a distribuição de tensões existentes para a malha de 15mm. Os resultados são semelhantes aos obtidos para os outros tamanhos de malha. Na Figura 13 pode ver-se a localização do ponto de deslocamento máximo, que também se manteve constante nos diversos ensaios.

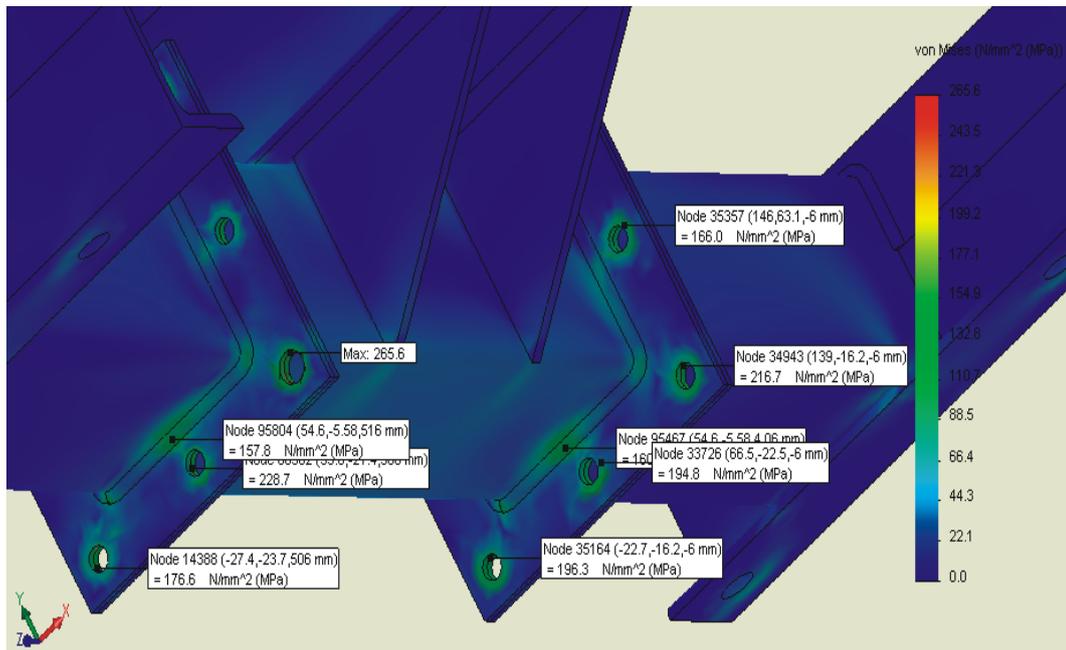


Figura 12 - Distribuição de tensões com malha de elementos com 15mm, sólidos, “high”

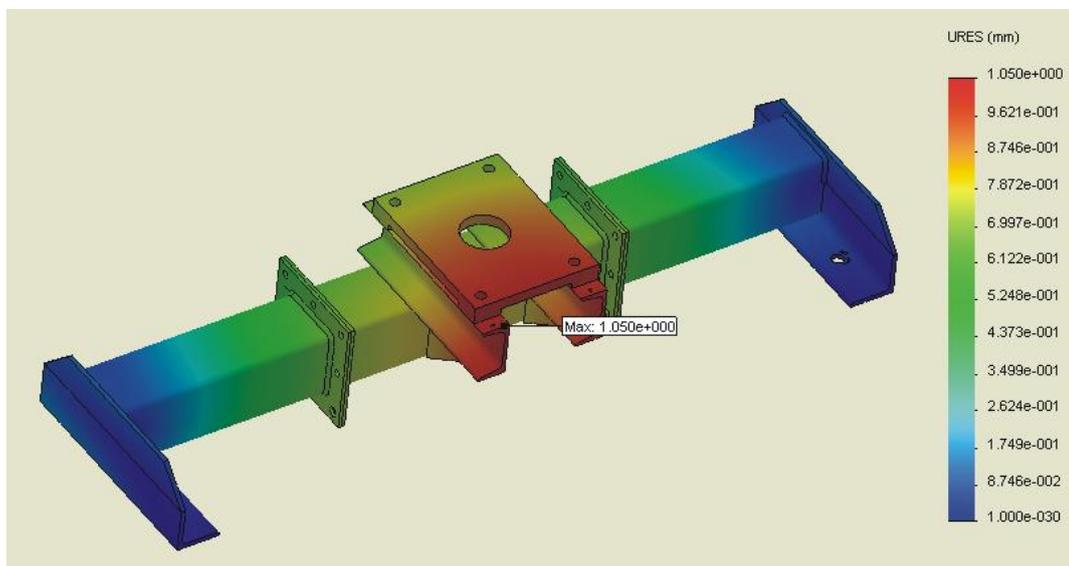


Figura 13 - Localização do deslocamento máximo com malha de elementos com 15mm, sólidos, “high”

Na análise de comportamento da estrutura modelada com elementos “draft”, foram efectuados diversos ensaios que se encontram resumidos na Tabela 7. Na Figura 14 pode observar-se a distribuição de tensões existentes para a malha de 12mm. Os resultados são semelhantes aos obtidos para os outros tamanhos de malha. Na Figura 15 pode ver-se a localização do ponto de deslocamento máximo.

Ensaio	Dimensão do elemento (mm)	Tipo de malha	Nº de elementos	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima Von Mises (MPa) (1)	Tensão máxima Von Mises (MPa) (2)
1	21	draft	32042	0,692	200,1	78,1
2	18	draft	40176	0,761	218,1	93,4
3	15	draft	52589	0,792	245,1	98,6
4	12	draft	79457	0,830	193,4	104,5
5	9	draft	143631	0,872	141,3	110,7
6	6	draft	403258	0,931	192,7	141,3

(1) - Valor máximo do conjunto completo (2) - Valor máximo do conjunto superior

Tabela 7 - Valores obtidos nos ensaios com elementos sólidos “draft”

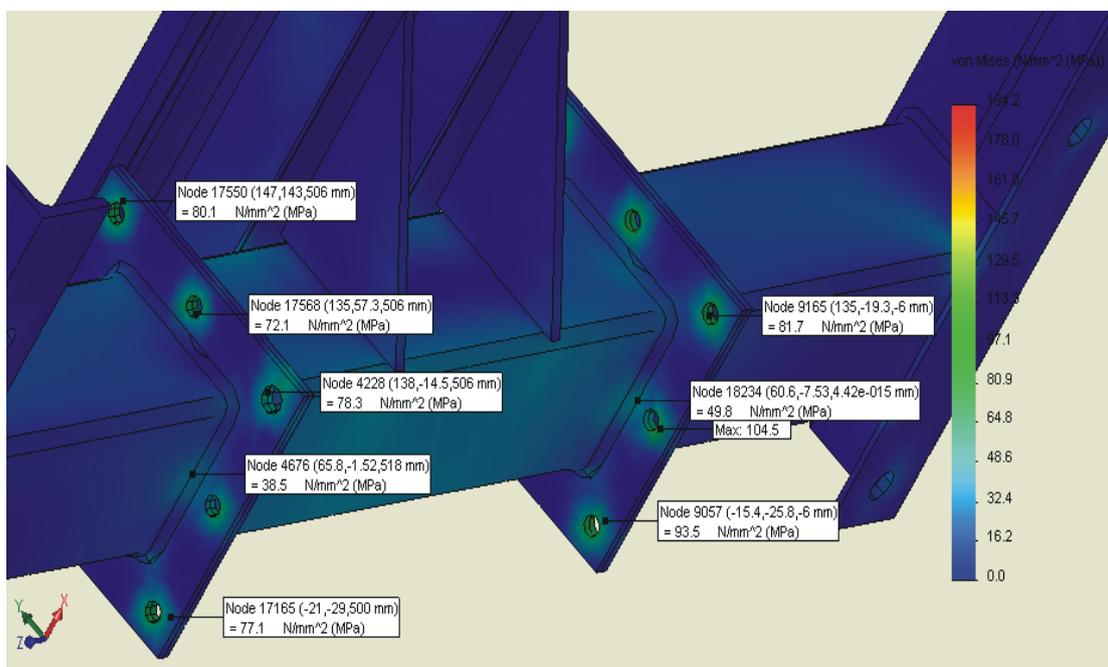


Figura 14 - Distribuição de tensões com malha de 12mm e elementos sólidos “draft”

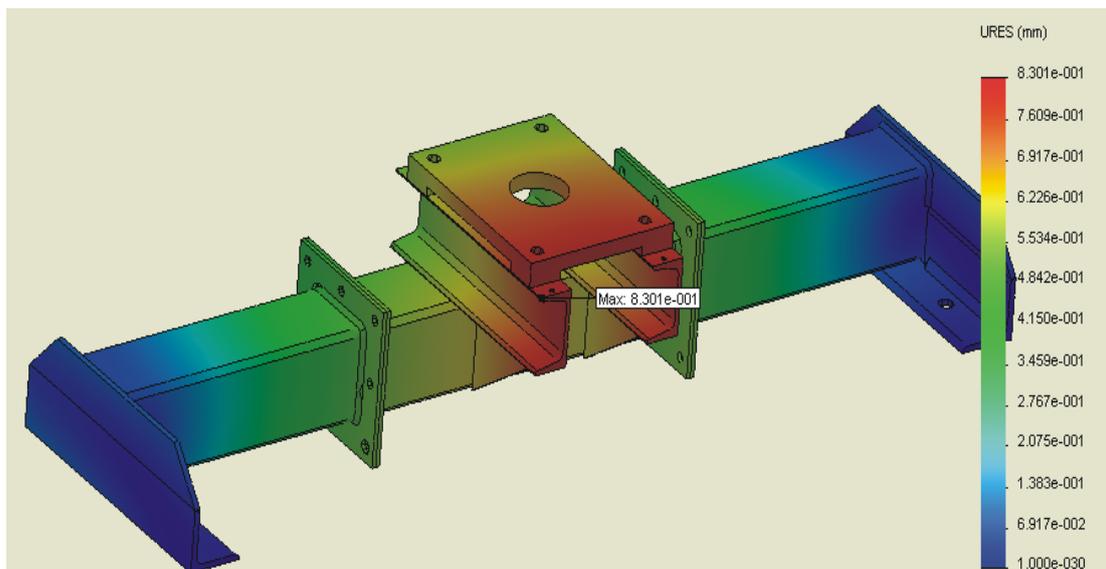


Figura 15 - Localização do deslocamento máximo com malha 12mm e elementos sólidos “draft”

Os resultados apresentados na Tabela 7 são colocados na forma de gráfico e apresentados nas figuras seguintes.

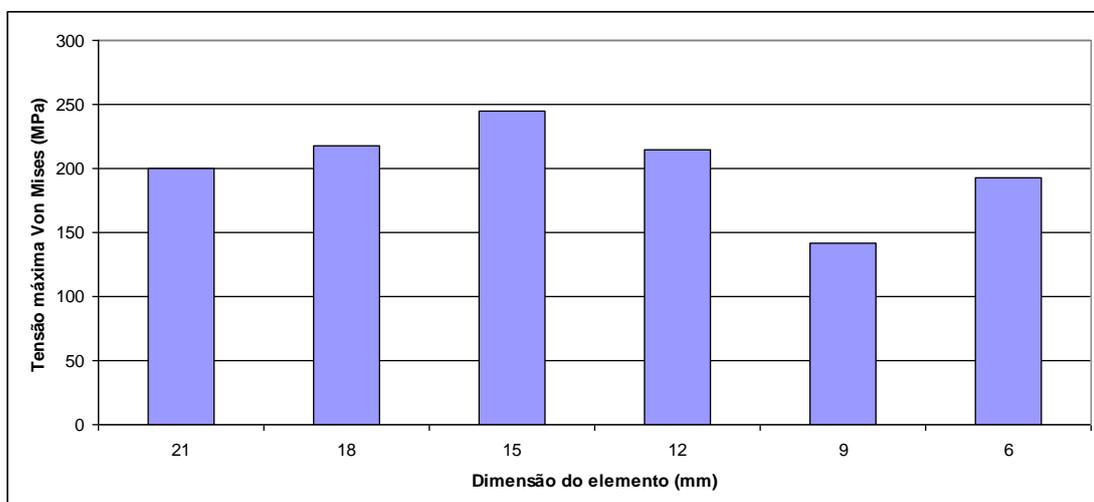


Gráfico 1 - Tensão máxima no conjunto completo

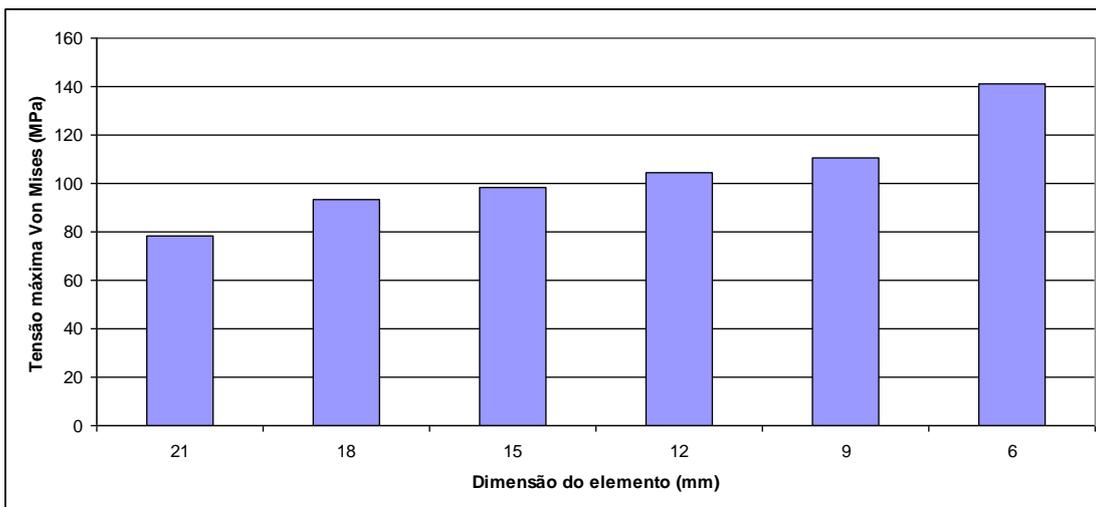


Gráfico 2 - Tensão máxima no conjunto superior

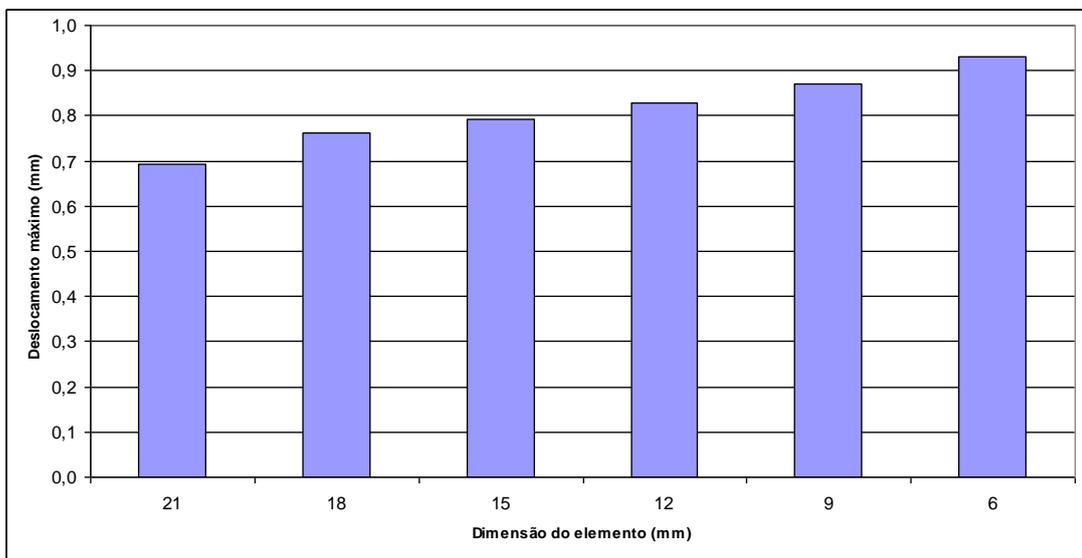


Gráfico 3 - Deslocamento máximo nos ensaios

A análise cuidada dos gráficos anteriores, permite-nos concluir que os resultados não apresentam um comportamento definido. De facto, no Gráfico 1 verifica-se uma variação aleatória da tensão máxima no conjunto completo com a diminuição do tamanho médio do elemento finito. Nos gráficos 2 e 3 o comportamento dos resultados não revela também qualquer tendência. A diminuição do tamanho médio do elemento finito é acompanhada por um aumento da tensão máxima no conjunto superior e um aumento do deslocamento máximo, respectivamente.

Na Figura 16 é apresentada a distribuição de tensões no conjunto completo, com elementos sólidos, “draft”, com 12mm de dimensão.

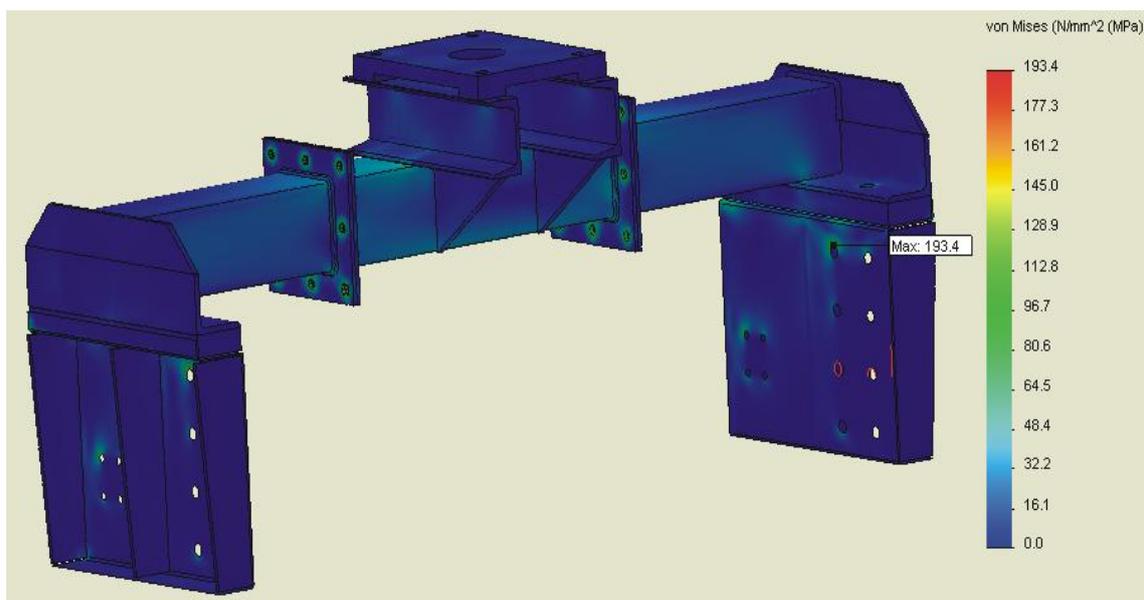


Figura 16 - Distribuição de tensões no conjunto completo

Um dos locais onde as tensões poderiam ter valores mais elevados era nas soldaduras. No entanto, os valores de tensão máxima foram atingidos em pontos afastados das mesmas (ver Figura 14 – *node* 4676 e 18234). Para perceber até que ponto o tamanho do elemento poderia induzir uma alteração dos pontos “quentes”, procedeu-se a um refinamento da malha na região das soldaduras. A Tabela 8 apresenta os resultados de um conjunto de ensaios realizados para o efeito, com elementos sólidos “draft”.

Dimensão do elemento (mm)	Refinação de malha (mm)	Nº de elementos	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima Von Mises (MPa) (1)	Tensão máxima Von Mises (MPa) (2)
6	5.25	403612	0,930793	192,404	144,4
6	4.7	402907	0,870219	169,800	81,6
6	4.6	402911	0,8704	170,000	78,8
6	4.5	403068	0,870651	170,124	80,1
6	3.75	409332	0,931225	193,544	144,1
6	3.25	416406	0,8787	172,400	89,3
6	2.25	451479	0,931778	193,146	181,6
(1) - Valor máximo do conjunto completo				(2) - Valor máximo do conjunto superior	

Tabela 8 - Valores obtidos nos ensaios com refinamento das soldaduras

O refinamento da malha considera um tamanho médio do elemento finito de 6mm e utiliza elementos do tipo linear sólido. Este tamanho de malha permite obter um número mais elevado de elementos finitos, o que teoricamente origina um maior rigor nos cálculos. Na Figura 17 é apresentada a distribuição de tensões com malha refinada nas soldaduras e nos furos. Como se pode observar, a tensão máxima (110,6 MPa) ocorre num dos furos, sendo que a tensão na região soldada (node 25410) é sempre menor do que a tensão verificada em qualquer furo.

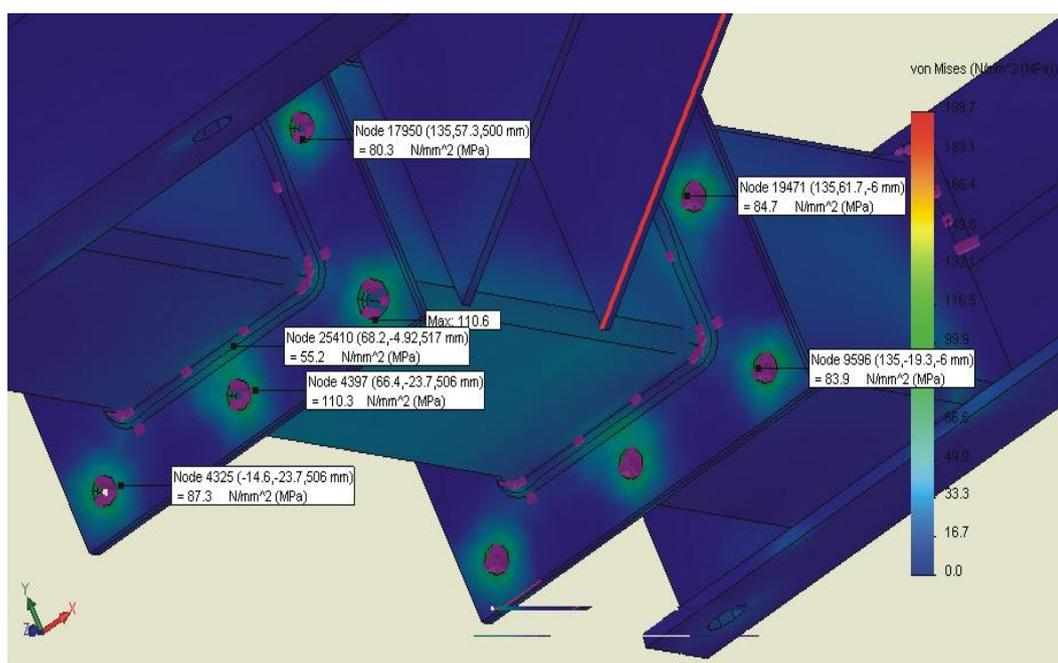


Figura 17 - Distribuição de tensões no conjunto superior

Em todos os ensaios realizados com refinação de malha nas soldaduras e nos furos, nunca foram obtidos valores da tensão máxima nas soldaduras, pelo que não serão consideradas como pontos críticos nos próximos ensaios.

5.6. Estudo nas ligações às guias

Inicialmente, a análise estrutural foi feita considerando o modelo completo da estrutura de suporte da máquina do elevador. Neste caso, a tensão máxima surge nos furos onde apertam os parafusos de fixação do conjunto às guias do elevador. Dado que as guias não fazem parte do conjunto e se encontram montadas na caixa do elevador, fixas à parede e apoiadas no chão, consideram-se como sendo imóveis. Tendo em conta estes pressupostos, a estrutura em estudo foi fixada pelo modo “*fixed geometry*” nos furos dos

parafusos, apresentando uma distribuição de tensões representada na Figura 18.

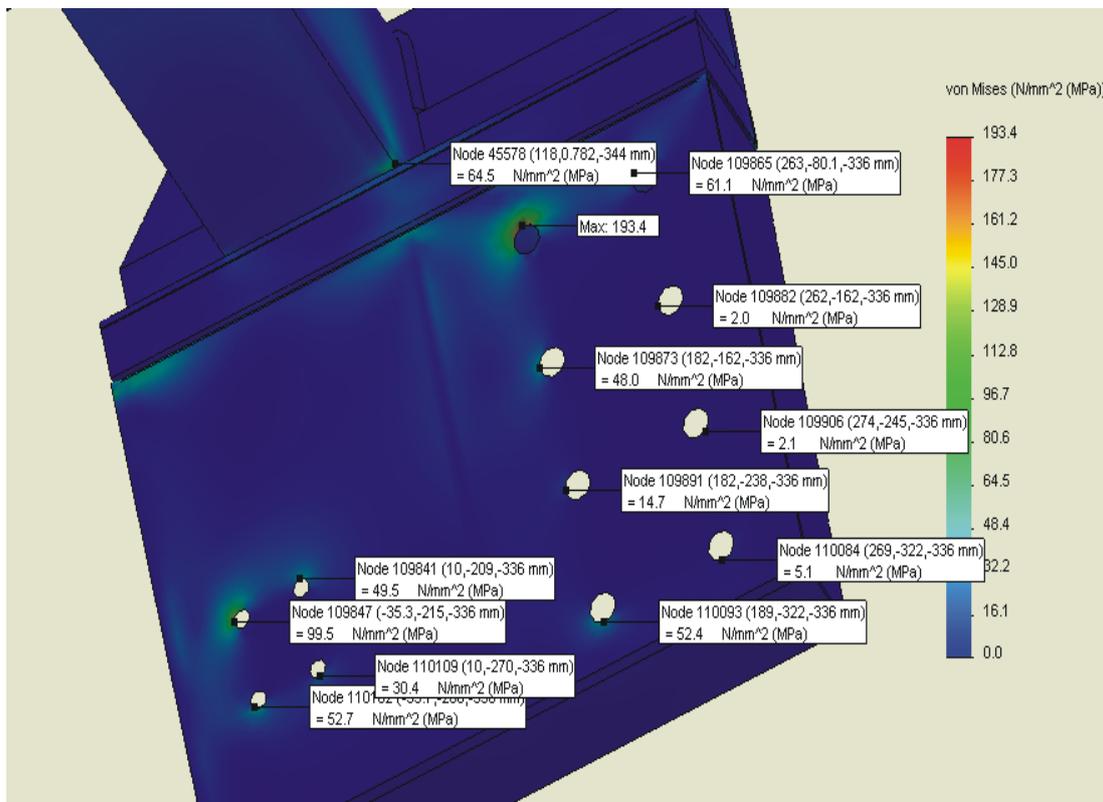


Figura 18 - Distribuição de tensões na fixação às guias

O tipo de fixação considerado restringe em absoluto os movimentos em qualquer direcção, o que não acontece na realidade quando são aplicados parafusos, pois entre um parafuso e o furo existe sempre uma folga. Esta folga é importante para distribuir de forma mais homogénea as tensões entre todos os parafusos. Na Figura 18 observa-se que a tensão máxima ocorre em apenas um dos 12 furos. Verifica-se que em todos os outros furos, a tensão é muito baixa. Dado que a força aplicada é no sentido descendente, este valor de tensão existente no perímetro de um furo não terá qualquer influência na segurança da estrutura. Afim de se comprovar esta observação foi feito um novo ensaio com os mesmos parâmetros, mas sem a fixação naquele furo. Pode observar-se o resultado na Figura 19.

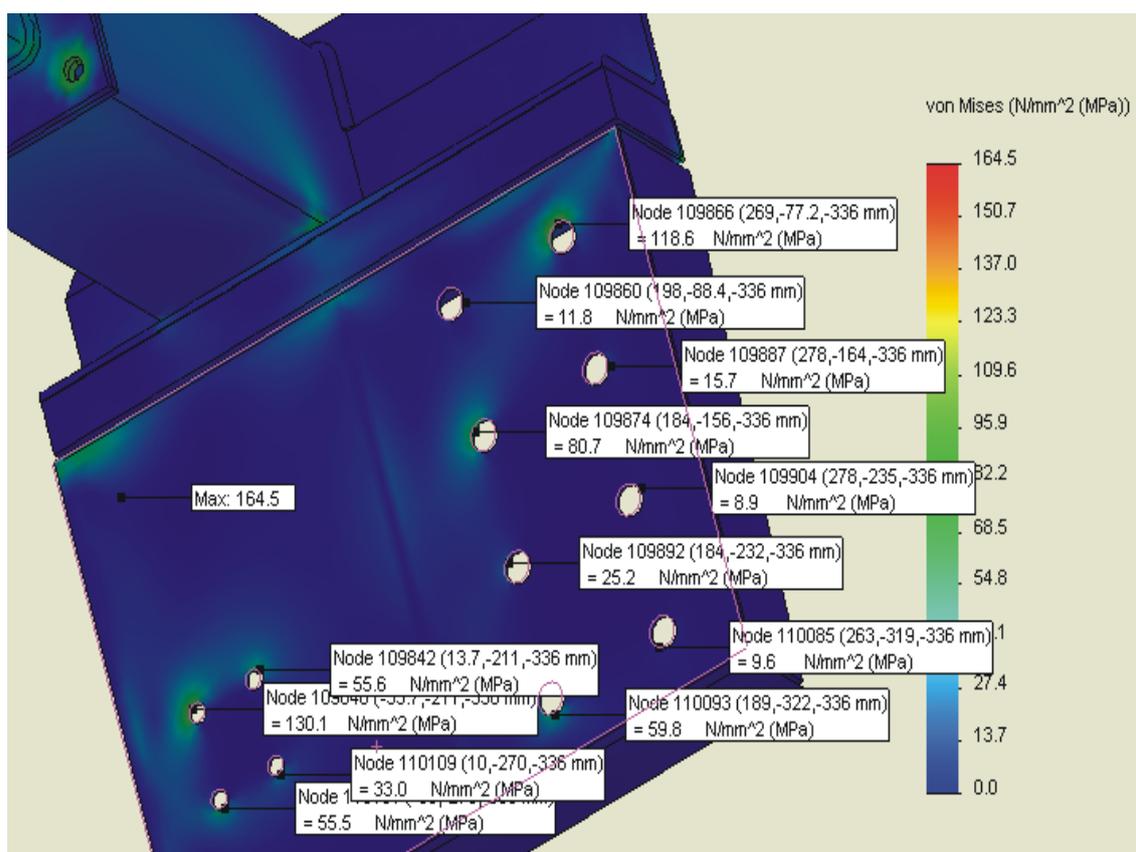


Figura 19 - Distribuição de tensões com menos uma fixação

Os valores de tensão que surgem nos furos adjacentes demonstram que a tensão máxima existente no furo em causa não constitui qualquer risco de colapso. Ou seja, assim que existir uma deformação do furo sobre maior tensão, as outras fixações anulariam qualquer outra evolução.

5.7. Estudo na estrutura superior

Na estrutura superior existem várias áreas com tensões elevadas, o que não acontece no caso anterior, onde as tensões estavam mais localizadas em torno de uma região Ver Figura 20. Nesta estrutura os valores mantêm-se elevados na zona de aperto dos conjuntos bem como no conjunto central, sendo que neste conjunto se regista o deslocamento máximo. Assim, doravante será considerada para estudo apenas a parte superior da estrutura.

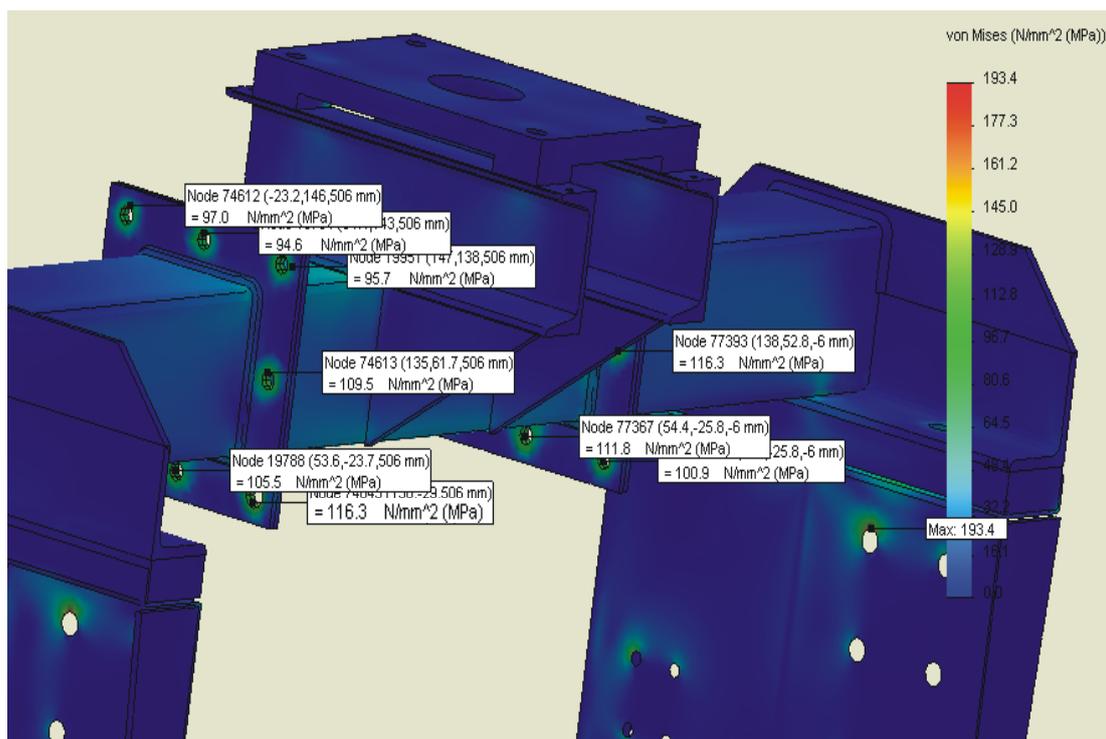


Figura 20 - Distribuição de tensões na união dos conjuntos

Em virtude de não se conhecerem as propriedades da borracha empregue como amortecedor, foram feitas várias simulações sem a mesma, alterando o tipo de fixação existente no contacto entre a mesma e o conjunto montado. Afim de determinar a situação mais crítica, e dado que a montagem apoia nos topos, foram simulados dois casos permitidos na configuração do programa. No primeiro (Figuras 21 e 22) foi fixada a aresta exterior, permitindo a todo o conjunto uma torção livre em torno do eixo X. No segundo caso (Figuras 23 e 24), foi fixada a superfície inferior de apoio lateral. Utilizou-se uma fixação do tipo “fixed geometry”. Os resultados de cada simulação estão nas figuras seguintes.

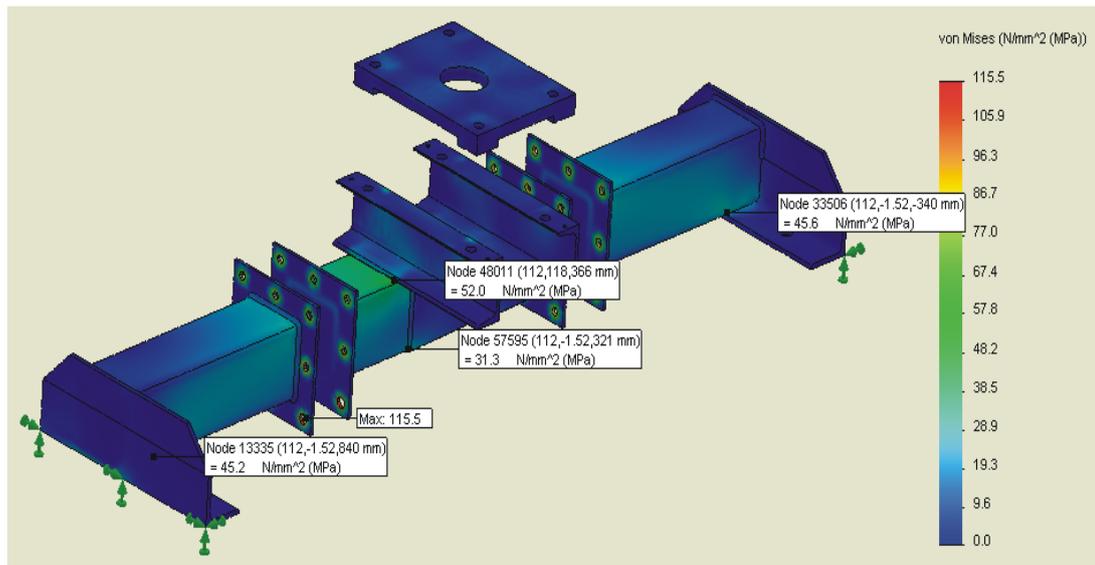


Figura 21 - Tensões com montagem apoiada nas arestas exteriores

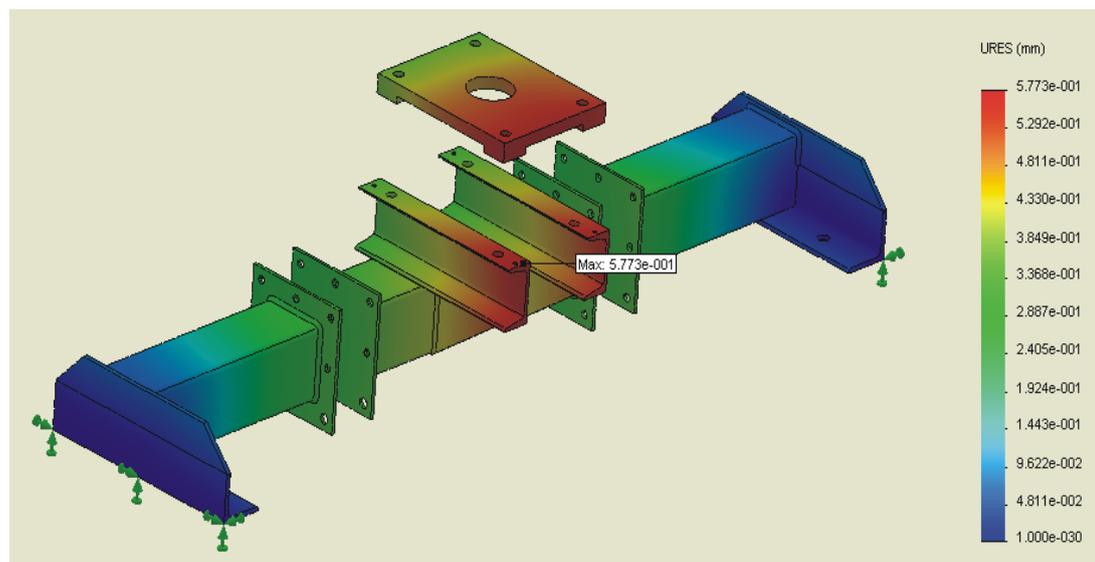


Figura 22 - Deslocamentos com montagem apoiada nas arestas exteriores

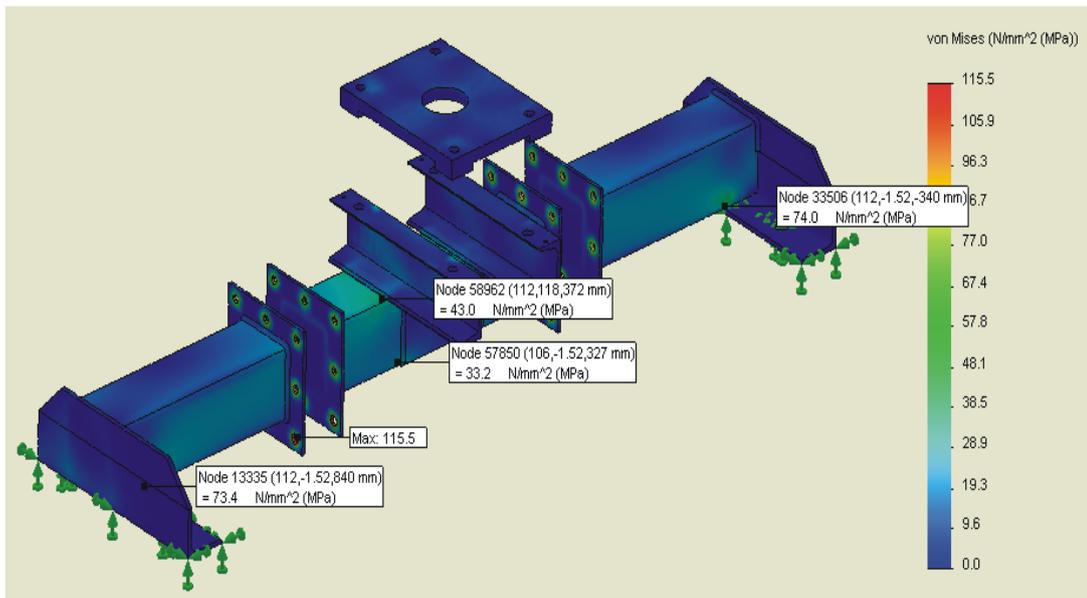


Figura 23 - Tensões com montagem fixada nas superfícies laterais inferiores

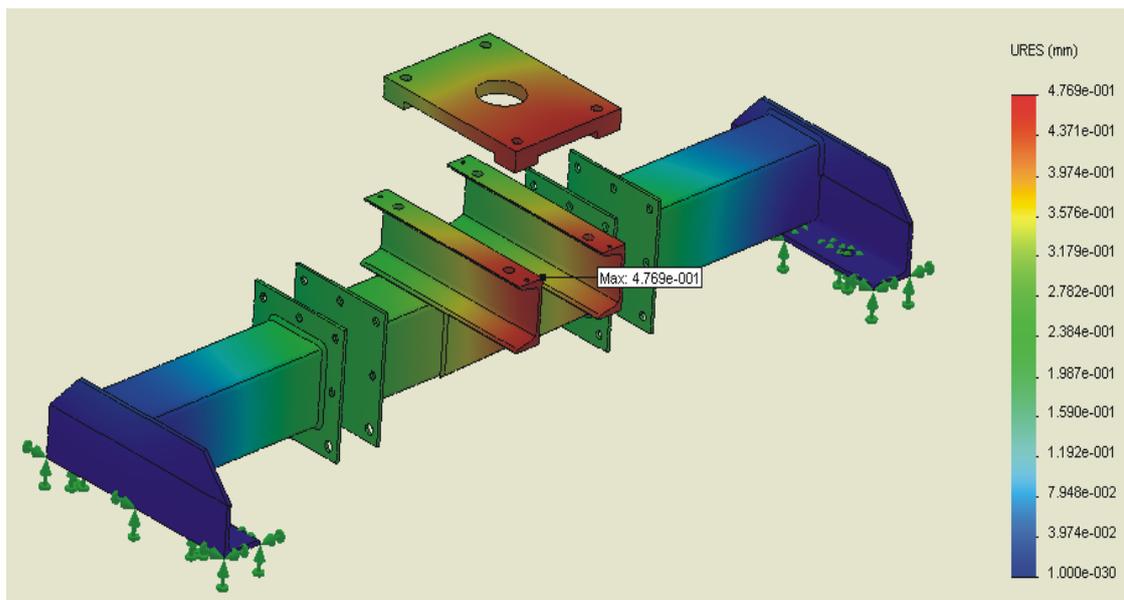


Figura 24 - Deslocamentos com montagem fixada nas superfícies laterais inferiores

Pela análise das duas situações, verifica-se que em todos os casos a tensão e o deslocamento máximo ocorrem no mesmo local, existindo no entanto diferenças nas tensões de modelo para modelo. No entanto, estas diferenças não são significativas dado que são inferiores ao valor da tensão máxima atingida na estrutura superior. Devido à maior diferença do valor de tensão localizado junto aos apoios, os próximos ensaios serão efectuados com a fixação usada nas Figuras 23 e 24.

5.7.1. Ensaios com elementos sólidos parabólicos

Na tabela seguinte encontram-se os valores obtidos nos ensaios para a estrutura superior, utilizando elementos tetraédricos parabólicos (high). Verifica-se que relativamente à estrutura completa (ver Tabela 6), os valores de tensão agora obtidos são semelhantes, embora os deslocamentos máximos obtidos sejam inferiores.

Dimensão do elemento (mm)	Tipo de malha	Nº de elementos	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima von Mises (MPa)
21	high	24958	0,528	223,02
18	high	30467	0,529	272,24
15	high	39474	0,533	262,04
12	high	58262	0,534	241,32
9	high	103831	0,535	273,61

Tabela 9 - Valores obtidos nos ensaios na estrutura superior e com elementos “high”

5.7.2. Ensaios com elementos sólidos lineares

Devido ao esforço computacional exigido na simulação com elementos “high”, que no caso da malha de 9 mm fez com que o ensaio decorresse por mais de 24 horas, foram feitos também os mesmos ensaios com elementos “draft”. Na tabela seguinte pode observar-se que a tensão máxima é inferior cerca de 60 a 70% relativamente aos elementos high. Os deslocamentos máximos também são cerca de 10 a 20% inferiores.

Dimensão do elemento (mm)	Tipo de malha	Nº de elementos	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima von Mises (MPa)
21	draft	24954	0,431	86,82
18	draft	30467	0,444	91,22
15	draft	39474	0,462	95,31
12	draft	58262	0,477	92,41
9	draft	103831	0,489	97,97
6	draft	296896	0,503	128,46

Tabela 10 - Valores obtidos nos ensaios na estrutura superior e com elementos “draft”

6. ESTUDO COM ELEMENTOS CASCA

Embora se tenham feito inúmeros ensaios, estes revelaram-se pouco fiáveis ou mesmo com erros. As simulações efectuadas originavam valores de tensão máxima e deslocamentos obtidos em diferentes pontos e com valores muito diferentes dos alcançados com os elementos sólidos, ver Figuras 25 a 28. A simulação de parafusos, embora fosse prevista e aceite pelo programa Solidworks, não apresentava resultados coerentes com a realidade, dado que se tratam de zonas de concentrações de tensão e nos resultados do ensaio, tal não se verificava. O mesmo tipo de ensaio, resolvido com e sem parafusos, apresentava os mesmos resultados finais. Embora se tenham efectuado vários testes com modelos desenhados como um todo ou com modelos montados individualmente, nunca foi possível alcançar resultados conclusivos, sendo que na maioria dos casos, a simulação era interrompida por erros que se tornaram impossíveis de contornar.

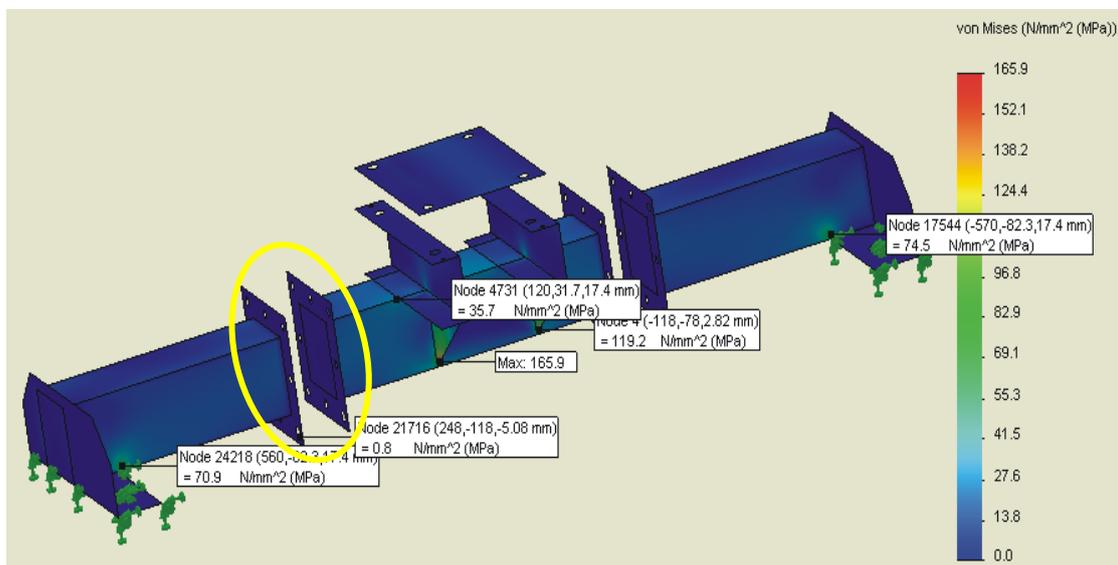


Figura 25 - Distribuição de tensões na montagem com conjuntos unitários de elementos casca

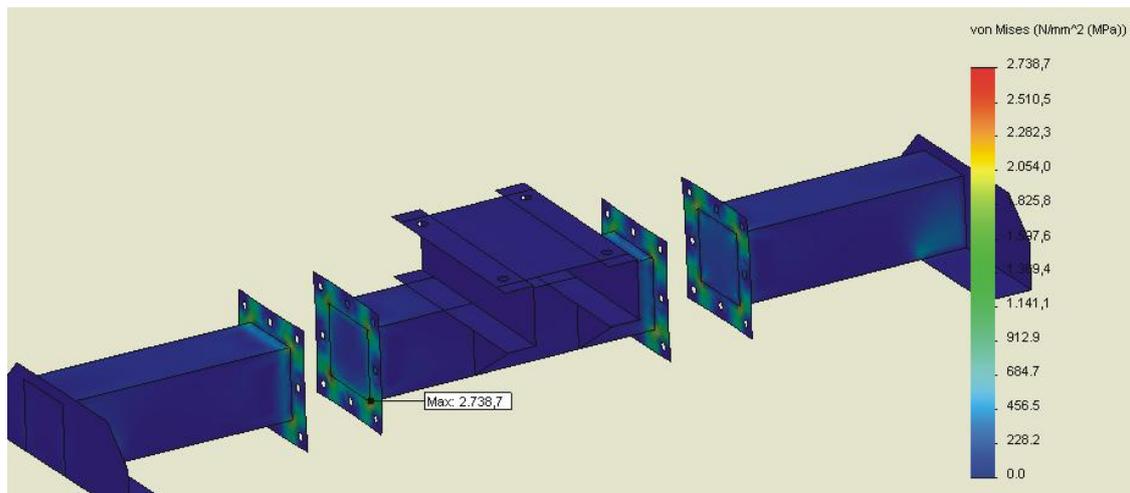


Figura 26 - Distribuição de tensões na montagem com conjuntos individuais de elementos casca

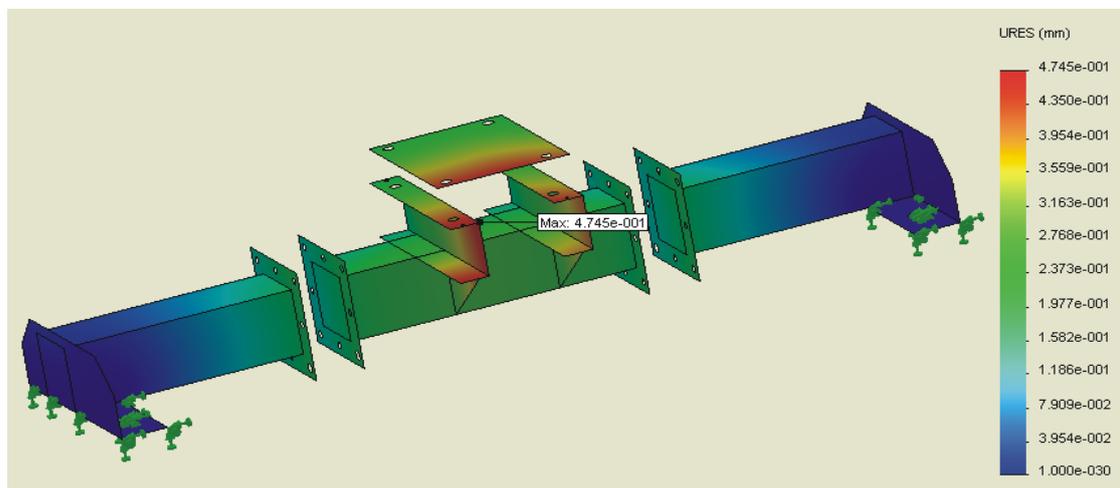


Figura 27 - Distribuição de deslocamentos na montagem com conjuntos unitários de elementos casca

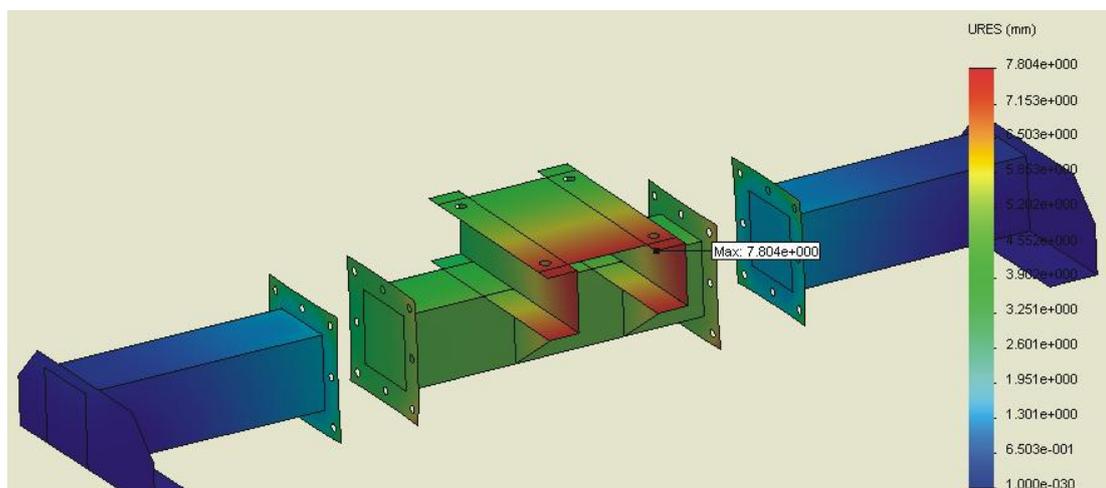


Figura 28 - Distribuição de deslocamentos na montagem com conjuntos individuais de elementos casca

7. ESTUDO COM ELEMENTOS MISTOS (SÓLIDOS E DE CASCA)

Em virtude dos inúmeros erros surgidos com a simulação com elementos casca, foi feita uma montagem com elementos de casca em conjunto com elementos sólidos. Neste caso, todo o conjunto é construído com elementos de casca, excepto as peças que se encontram unidas por parafusos (falanges), que são modeladas com elementos sólidos. Desta forma, conseguiu-se finalizar o estudo, embora se tenham recorrido a soluções de desenho que implicaram a introdução de mais peças no conjunto. Todas as tentativas efectuadas considerando um conjunto de peças como sendo uma única peça não deram resultados. Sempre que era aplicado uma descontinuidade na superfície (*split line*) a fim de obter resultados mais coerentes, o modelo tornava-se instável ou com deslocamentos demasiado elevados que originavam erros e interrupção da simulação. Também não resultaram as tentativas de efectuar as simulações com peças constituídas de forma individual e montadas num conjunto. A única forma que deu resultados, foi a de constituir cada conjunto por peças individuais, unidas umas às outras com ligações "*bonded*" e nas zonas de contacto, criar novas peças em modo de superfície e com a geometria resultante das superfícies em contacto no modelo. Foram assim introduzidos vários desenhos de novas peças na montagem final. Sempre que eram solicitados pelo programa os valores das espessuras destas novas peças, era-lhes atribuído o valor da soma das duas espessuras das peças em contacto, ou seja, sempre que existam duas superfícies em contacto, os desenhos das duas peças deram origem a três desenhos: dois com o desenho de cada uma das peças sem a superfície de contacto e um terceiro desenho, só com a forma da superfície de contacto.

Com este tipo de simulação, anularam-se os erros que aconteciam na zona dos parafusos. Houve também necessidade de aplicar ligações "*bonded*" individualmente apesar de o conjunto estar definido com ligações "*bonded global*".

Na Tabela 11, a placa que simula a máquina, local onde é aplicada a força exterior, foi modelada com elementos lineares de casca e com uma espessura de 20mm.

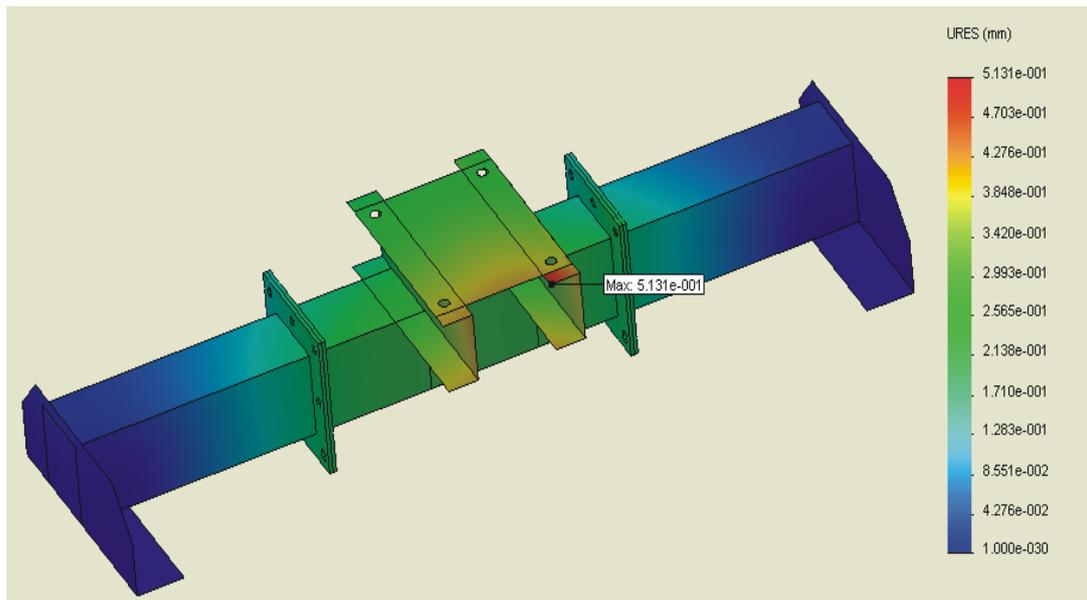


Figura 30 - Distribuição de deslocamentos com elementos lineares, mistos e com placa da máquina com elementos casca

Foram também feitos ensaios em que a placa que simula a máquina foi considerada com elementos sólidos. Os resultados estão na tabela seguinte:

Dimensão do elemento (mm)	Tipo de elemento	Nº de elementos	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima von Mises (MPa)
25	draft	9389	0,406	77,9
21	draft	11687	0,410	81,9
18	draft	14433	0,420	92,8
15	draft	18932	0,421	91,7
12	draft	28004	0,420	96,5
9	draft	50033	0,424	102,0

Tabela 12 - Resultados obtidos com elementos lineares, mistos e placa da máquina em elementos sólidos

Não foi possível efectuar o ensaio com 6mm porque terminava sempre com erro. As figuras 29 e 30 mostram a distribuição de tensões e deslocamentos para a malha de 12mm “draft”.

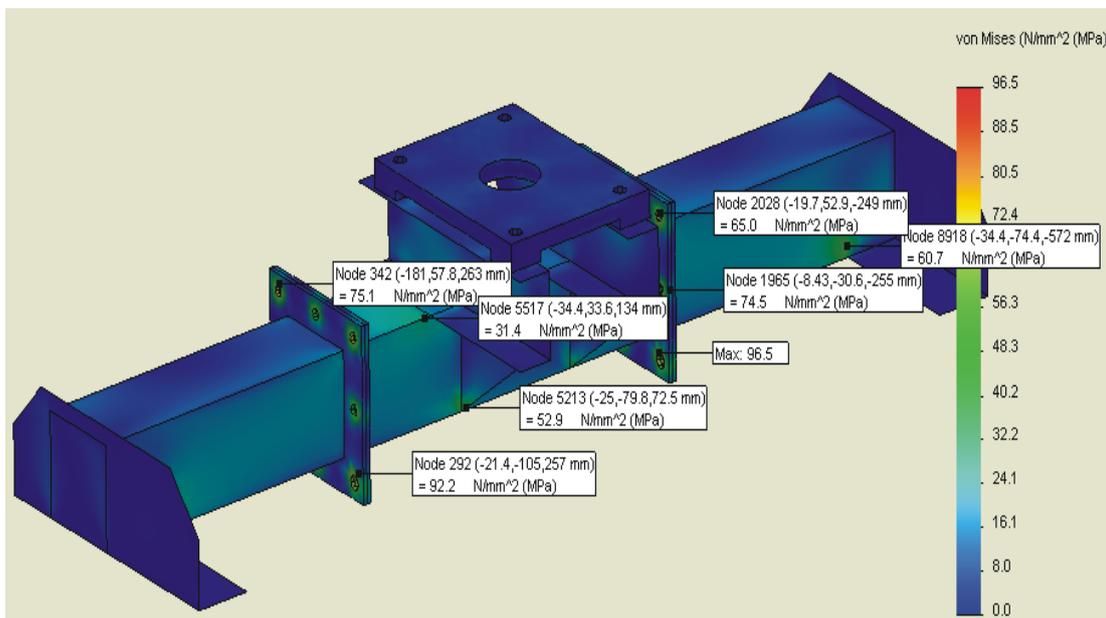


Figura 31 - Distribuição de tensões com elementos lineares, mistos e com placa da máquina com elementos sólidos

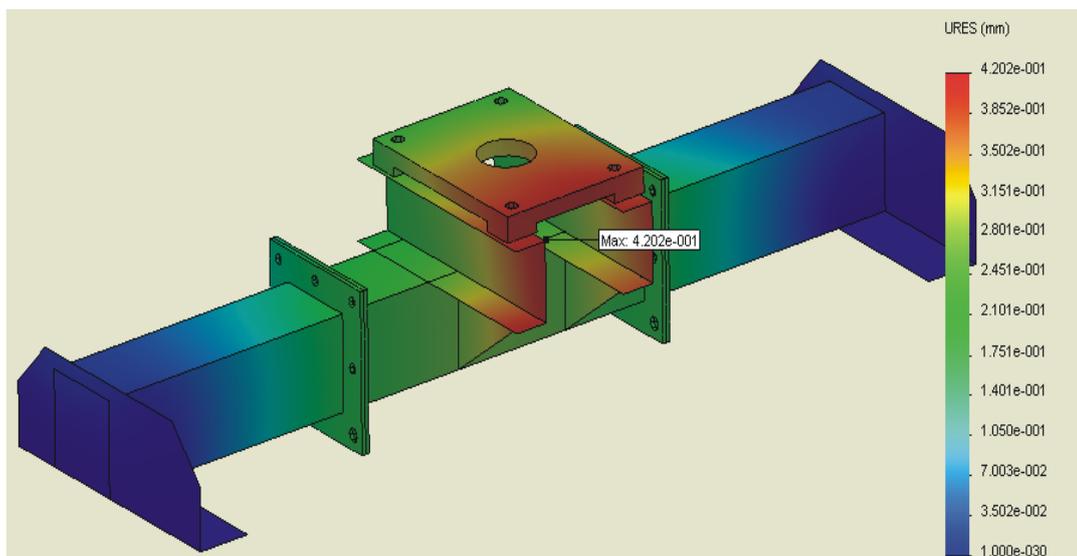


Figura 32 - Distribuição de deslocamentos com elementos lineares, mistos e com placa da máquina com elementos sólidos

Como se pode verificar pela análise das Tabelas 11 e 12, os valores obtidos são semelhantes.

Os valores da Tabela 13 foram obtidos para a mesma estrutura, com elementos mistos parabólicos. Pelos ensaios com a malha de 21 e de 18, os únicos que correram, verifica-se que a tensão assume valores semelhantes aos dos ensaios com elementos sólidos parabólicos (ver Tabela 6). Nas Figuras 33 e 34 podem ver-se as distribuições de tensões

e de deslocamentos com malha de 18mm.

Dimensão do elemento (mm)	Tipo de malha	Nº de elementos	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima von Mises (MPa)
21	high	11707	0,638	224,50
18	high	30467	0,606	241,60

Tabela 13 - Resultados obtidos com elementos parabólicos, mistos e placa da máquina em elementos sólidos

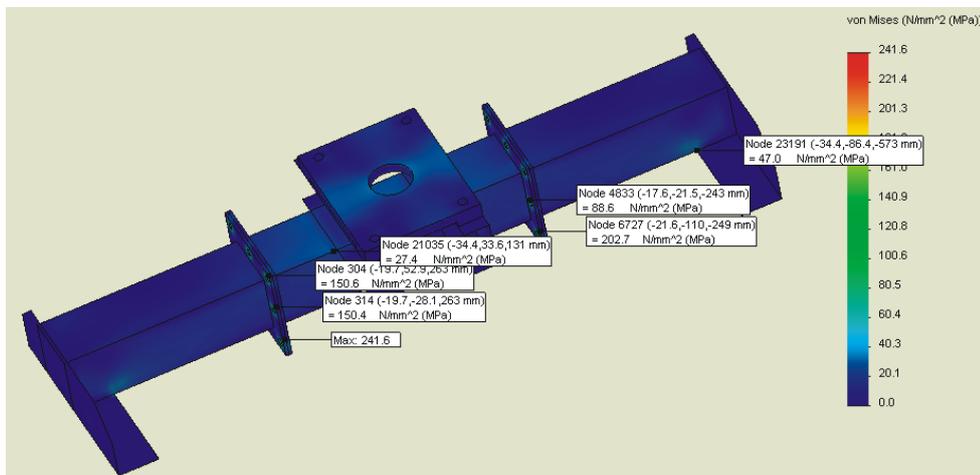


Figura 33 - Distribuição de tensões com elementos parabólicos, mistos e com placa da máquina com elementos sólidos

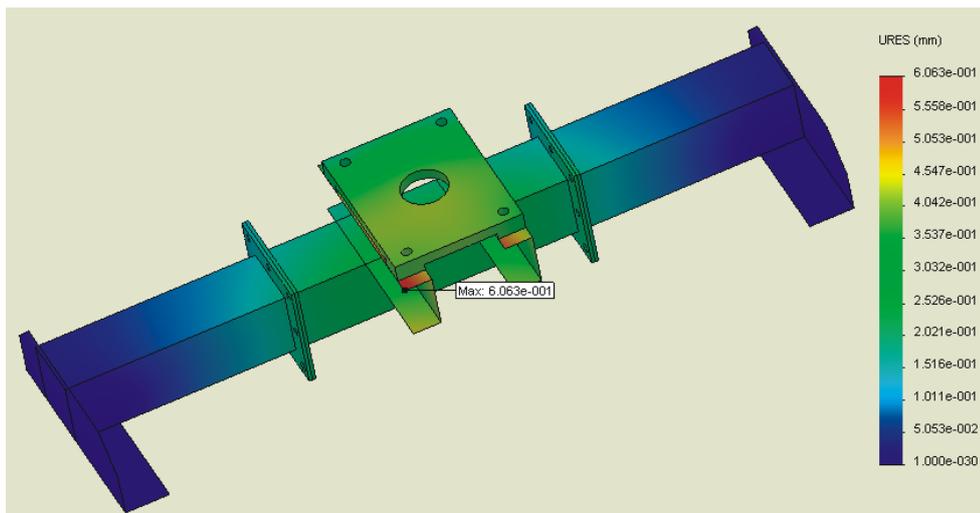


Figura 34 - Distribuição de deslocamentos com elementos parabólicos, mistos e com placa da máquina com elementos sólidos

8. RESUMO DOS ENSAIOS REALIZADOS

Na Tabela 14 encontra-se um resumo dos ensaios efectuados com malha de dimensão 6, 9, 12, 15, 18 e 21mm.

Ensaio	Dimensão do elemento (mm)	Tipo de malha	Nº de elementos	Deslocamento máximo (mm)	Tensão máxima von Mises (MPa)
sol top	21	high	24958	0,528	223,02
sol top	18	high	30467	0,529	272,24
sol top	12	high	58262	0,534	241,32
sol top	15	high	39474	0,533	262,04
sol top	9	high	103831	0,535	273,61
sol top	6	high	RNA	RNA	RNA
sol top	21	draft	24954	0,431	86,82
sol top	18	draft	30467	0,444	91,22
sol top	15	draft	39474	0,462	95,31
sol top	12	draft	58262	0,477	92,41
sol top	9	draft	103831	0,489	97,97
sol top	6	draft	296896	0,503	128,46
mt pl sol	21	high	11707	0,638	224,50
mt pl sol	18	high	30467	0,606	241,60
mt pl csc	21	draft	10324	0,514	81,78
mt pl csc	18	draft	12254	0,517	96,21
mt pl csc	15	draft	15577	0,496	91,72
mt pl csc	12	draft	22564	0,513	96,57
mt pl csc	9	draft	36784	0,484	101,74
mt pl csc	6	draft	87472	0,461	148,82
mt pl sol	21	draft	11687	0,410	81,87
mt pl sol	18	draft	14433	0,420	92,79
mt pl sol	15	draft	18932	0,421	91,70
mt pl sol	12	draft	28004	0,420	96,54
mt pl sol	9	draft	50033	0,424	101,98
mt pl sol	6	draft	118978	0,404	149,17

Tabela 14 - Resumo dos resultados obtidos na estrutura superior

Legenda:

sol top - ensaio com elementos sólidos só com a estrutura superior

mt pl csc - ensaio com elementos mistos e placa da máquina com elementos casca

mt pl sol - ensaio com elementos mistos e placa da máquina com elementos sólidos

RNA – Resultado não alcançado

Os valores nos dois tipos de ensaios “mt pl csc” e “mt pl sol” possuem variações semelhantes em termos percentuais. Para o ensaio “mt pl sol” com elementos “draft” de 6mm, foram atribuídos valores por comparação com os obtidos nos ensaios “mt pl csc”.

Analisando o Gráfico 4, pode-se verificar que existem diferenças entre os diversos modelos de ensaios.

Conclui-se que existem dois grupos de resultados: os obtidos com elementos lineares (draft) e os obtidos com elementos parabólicos (high).

Em cada um destes grupos, quer se tenham modelado com elementos sólidos ou com elementos mistos, as diferenças nos valores obtidos são muito baixas.

Os ensaios com elementos parabólicos levavam muitas horas a correr para elementos de pequena dimensão (6, 9, 12 e 15mm) e frequentemente eram interrompidos com erros. No entanto, pelos valores obtidos nos ensaios realizados com os elementos sólidos parabólicos, pode-se prever que as tensões e os deslocamentos nos ensaios com elementos mistos parabólicos deverão ter valores da mesma ordem de grandeza dos primeiros. Verifica-se que as tensões máximas de *von Mises* obtidas em ensaios com elementos parabólicos, como valores entre 220MPa e 270MPa, são sempre superiores às obtidas em ensaios com elementos lineares, com valores entre 80MPa e 150MPa.

Os valores dos deslocamentos máximos estão bastante aproximados dentro do tipo de elementos que foram utilizados. Em ensaios com elementos parabólicos o valor do deslocamento varia entre 0,43mm e 0,64mm e nos ensaios com elementos lineares varia entre 0,41mm e 0,51mm.

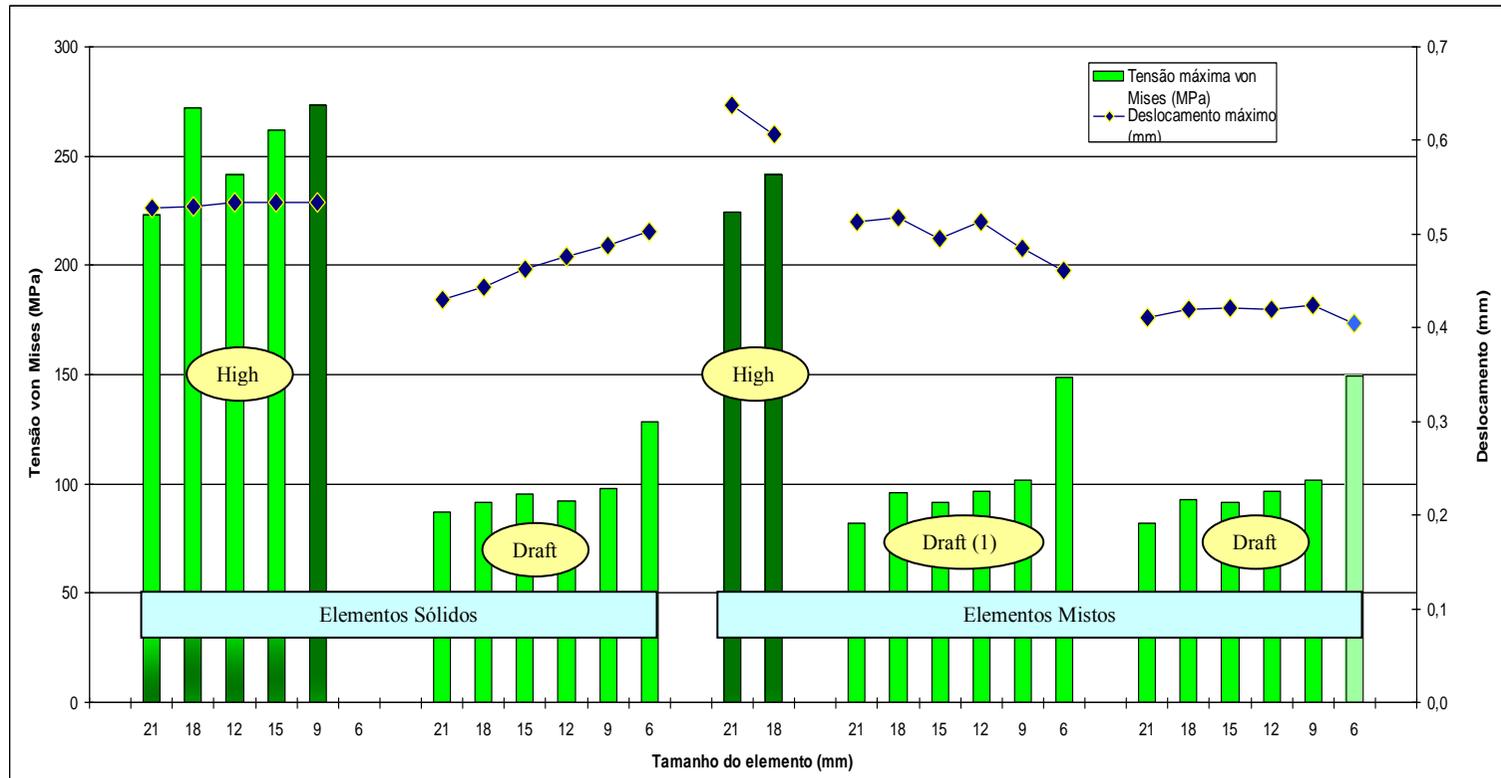


Gráfico 4 - Resultados obtidos com diversos tipos de elementos

Legenda:

High – Ensaios com elementos tetraédricos parabólicos

Draft – Ensaios com elementos tetraédricos lineares

Draft (1) – Ensaios com elementos mistos e com a placa da máquina com elementos casca. Nos restantes ensaios, a placa da máquina foi simulada com elementos sólidos.

9. CONCLUSÕES

Pode concluir-se que adoptando qualquer um dos modelos com elementos sólidos ou com elementos mistos, a diferença nos valores dos resultados finais não é significativa.

A maior diferença surge quando se fazem ensaios com elementos “draft” versus ensaios com elementos “high”. Existem diferenças bastante elevadas em termos de tensões máximas, com os valores dos ensaios com elementos “high” a superarem o dobro dos valores com elementos “draft”.

Terá que ser analisada a estrutura com um modelo experimental, para se poder verificar qual dos métodos se adequa melhor.

Tendo em conta o exigido pela norma, sendo que a estrutura superior não sofre qualquer influência da actuação do pára-quebras e o aço empregue na construção da bancada tem um alongamento de 26%, então o coeficiente de segurança a aplicar será 2,25 (ver Tabela 3).

O material utilizado na construção da estrutura de suporte tem uma a tensão média de rotura de 440 MPa, pelo que a tensão admissível σ_{perm} terá que ser sempre inferior a 195 MPa (Tabela 4 – Carga em utilização normal).

A Figura 35 mostra distribuição de tensões acima de 195 MPa para o ensaio com malha de elementos sólidos “high”, com 9mm de dimensão. Note-se que em toda a estrutura, apenas esta zona possui tensões acima de 195MPa.

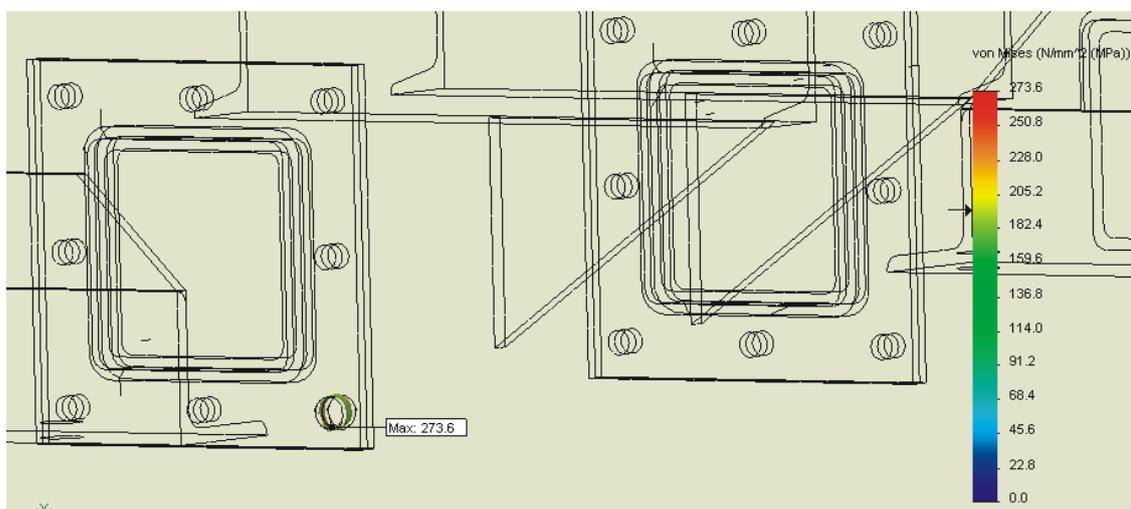
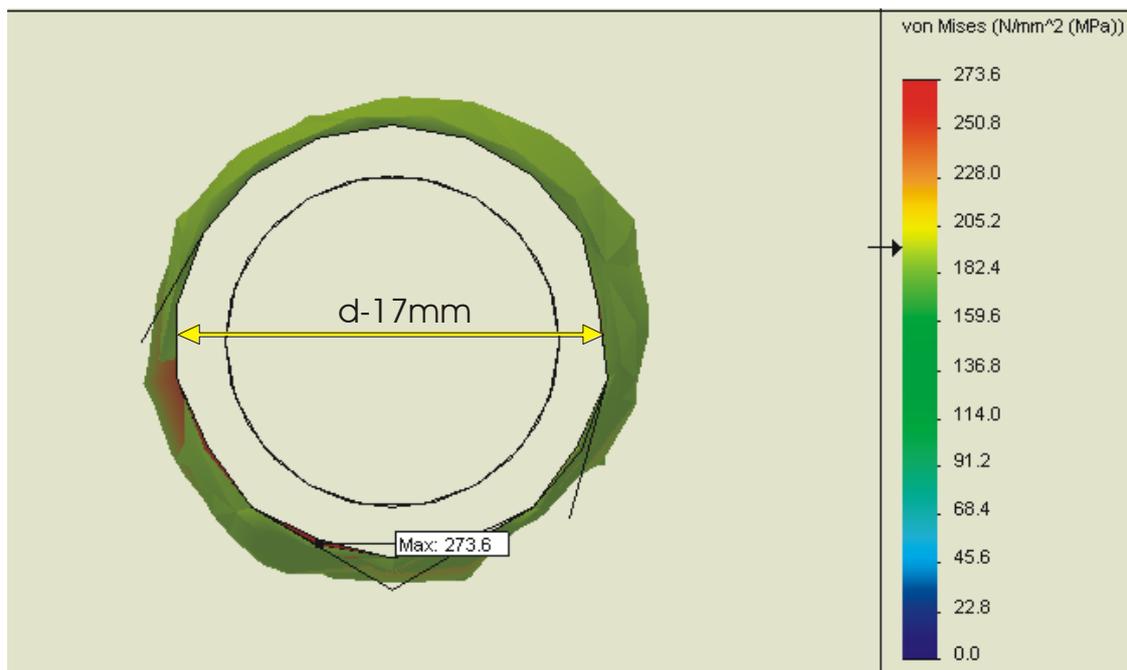


Figura 35 - Distribuição de tensões superiores a 195 MPa, com elementos sólidos “high”, com 9mm de dimensão



Na Figura 36, pode observar-se a distribuição de tensões com valores superiores a 195 MPa, que se situam num único local e com uma extensão muito pequena. Tais tensões situam-se no interior de duas chapas que estão encostadas e apertadas por parafusos com cabeça sextavada, anilha e porca. O binário de aperto, o diâmetro da anilha, bem como da cabeça do parafuso garantem só por si que estas tensões interiores jamais terão qualquer efeito na restante estrutura.

A Figura 37 mostra a distribuição de tensões para o ensaio com malha de elementos high com 18mm, mistos e com a placa da máquina de elementos sólidos.

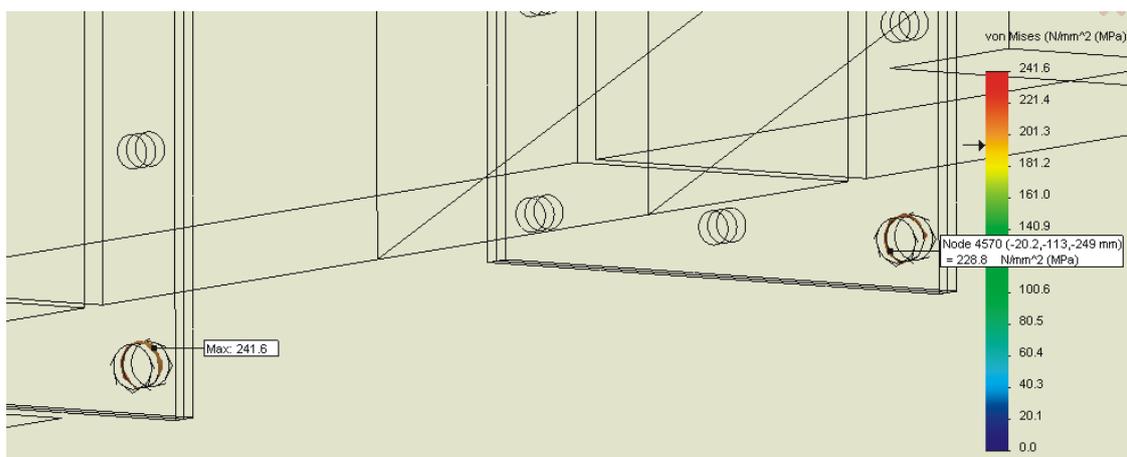




Figura 38 – Vista em pormenor das tensões na zona do furo

Também se verifica neste caso o mesmo que com o exemplo da Figura 35. A tensão máxima atingida e a zona de concentração de tensões não afectarão a estrutura pelos motivos anteriormente explicados.

As figuras 35 a 38 são referentes aos dois ensaios que revelaram os maiores valores de tensão máxima de *von Mises* ao longo dos ensaios efectuados, pelo que se mostra desnecessário fazer esta análise para outros ensaios.

Assim, nos ensaios efectuados, qualquer que tenha sido o método utilizado, podemos considerar que a tensão de rotura é inferior a 195 MPa, pelo que a estrutura da bancada do elevador cumpre os parâmetros estabelecidos pela Norma NP EN 81-1:2000.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SolidWorks 2010 Tutorials e SolidWorks Simulation Tutorials.

Zienkiewicz, O. C. e Taylor, R. L., The Finite Element Method, Butterwort-Heinemann, Woburn, Massachussets (2000).

MSC/NASTRAN – Nastran and Patran user guide, MSC Software, URL: www.mscsoftware.com. (2005)

11. ANEXO 1

Extracto da Norma NP EN 81-1:2000, relativo ao capítulo 10.

NP
EN 81-1
2000

p. 62 de 192

9.10.10 O órgão de controlo da velocidade do ascensor, provocando a actuação do dispositivo de protecção contra a velocidade excessiva da cabina na subida, deve ser:

- a) ou um limitador de velocidade satisfazendo as prescrições de **9.9**;
- b) ou um dispositivo satisfazendo as prescrições de **9.9.1, 9.9.2, 9.9.3, 9.9.7, 9.9.8.1, 9.9.9, 9.9.11.2** e onde fique garantida a equivalência com **9.9.4, 9.9.6.1, 9.9.6.2, 9.9.6.5, 9.9.10** e **9.9.11.3**.

9.10.11 O dispositivo de protecção contra a velocidade excessiva da cabina na subida é considerado componente de segurança e deve ser ensaiado de acordo com as prescrições de **F.7**.

10 Guias, amortecedores, dispositivos de fim de curso de segurança

10.1 Disposições gerais referentes às guias

10.1.1 A resistência das guias, das suas fixações e dos dispositivos que ligam os seus elementos deve ser suficiente para suportar as cargas e os esforços que lhes são aplicados de forma a garantir o funcionamento em total segurança do ascensor.

Os aspectos de funcionamento em total segurança do ascensor, no que respeita às guias, são os seguintes:

- a) o guiamento da cabina e do contrapeso ou da massa de equilíbrio deve estar garantido;
- b) as flechas devem estar limitadas de modo que:
 - 1. não possa produzir-se o desencravamento involuntário das portas;
 - 2. não fique afectado o funcionamento dos dispositivos de segurança;
 - 3. não seja possível a colisão das peças móveis com outros elementos.

As tensões devem ser limitadas tendo em consideração a repartição da carga nominal na cabina como indicado em **G.2, G.3** e **G.4** ou conforme a utilização pretendida e negociada (**0.2.5**).

NOTA: O anexo G descreve um método de selecção de guias.

10.1.2 Tensões e flechas admissíveis

10.1.2.1 As tensões admissíveis devem determinar-se pela fórmula seguinte :

$$\sigma_{perm} = \frac{R_m}{S_f}$$

em que:

- σ_{perm} é a tensão admissível em newtons por milímetro quadrado;
- R_m é a resistência à tracção newtons por milímetro quadrado;
- S_f é o coeficiente de segurança.

O coeficiente de segurança deve ser o indicado no **quadro 3**.

Quadro 3: Coeficientes de segurança aplicáveis às guias

Casos de carga	Alongamento (A_s)	Coefficiente de segurança
Carga em utilização normal	$A_s > 12 \%$	2,25
	$8 \% \leq A_s \leq 12 \%$	3,75
Actuação de pára-queda	$A_s > 12 \%$	1,8
	$8 \% \leq A_s \leq 12 \%$	3,0

Os materiais com alongamento inferior a 8% consideram-se demasiado quebradiços e não devem ser utilizados.

Para guias satisfazendo a norma ISO 7465, podem utilizar-se os valores de σ_{perm} indicados no **quadro 4**.

Quadro 4: Tensões admissíveis σ_{perm}

Valores em N/mm²

Casos de carga	R_m		
	370	440	520
Carga em utilização normal	165	195	230
Actuação do pára-queda	205	244	290

10.1.2.2 Para guias em perfil T, as flechas máximas admissíveis são as seguintes:

- a) 5 mm nas duas direcções para as guias de cabina e de contrapeso ou de massa de equilíbrio com pára-queda;
- b) 10 mm nas duas direcções para as guias de contrapeso ou de massa de equilíbrio sem pára-queda.

10.1.3 A fixação das guias aos seus suportes e ao edifício deve permitir compensar, automaticamente ou por simples regulação, os efeitos devidos ao assentamento normal do edifício e às contracções do betão.

Deve ser impedida uma rotação das fixações que possa provocar a libertação da guia.

10.2 Guias da cabina, do contrapeso ou da massa de equilíbrio

10.2.1 Tanto a cabina, como o contrapeso ou a massa de equilíbrio devem ser guiadas, pelo menos, por duas guias rígidas de aço.

10.2.2 As guias devem ser de aço estirado ou as superfícies de deslizamento devem ser trabalhadas se: