
Análise estrutural do quadro de um motociclo todo-o-terreno

Jaime Gonçalo Silva Teixeira

Dissertação submetida em
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
para o grau de:

Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. José Luís Soares Esteves

Co-Orientador:
Prof. Marco Paulo Lages Parente

Orientador da empresa:
Eng^o Miguel Ângelo Nogueira da Costa Oliveira

Departamento de Engenharia Mecânica
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, 2021

O trabalho apresentado nesta dissertação foi efectuado no
Departamento de Engenharia Mecânica
Faculdade de Engenharia
Universidade do Porto
Porto, Portugal.

Jaime Gonçalo Silva Teixeira
E-mail: up201503459@fe.up.pt

Resumo

Esta tese surgiu da necessidade da empresa de motocicletas AJP estudar e otimizar estruturalmente através de simulação numérica partes da geometria do quadro do modelo PR3 e PR4 que se encontram em desenvolvimento para atualização. Nesta tese foram estudadas as traves deste quadro e a peça tubular em aço de ligação entre as duas traves.

Em primeiro lugar, considerou-se uma situação crítica na qual todo o peso do conjunto motociclo mais condutor é aplicado, com um fator dinâmico de 4, no braço da roda traseira, no eixo de rotação da roda. Para se poder proceder à simulação através de elementos finitos, calculou-se de que forma os esforços resultantes desta situação são transmitidos para a parte do quadro em análise recorrendo-se, para isso, a uma simulação no *software inventor*.

Em segundo lugar, analisaram-se as traves da antiga geometria, que já foram comercializadas durante vários anos, para que se pudesse fazer uma comparação com a nova geometria. Assim, após feitas as simulações no *software abaqus* e analisados os resultados, verificou-se que esta geometria apenas contém uma pequena zona que poderia levar, num caso extremo, à sua deformação plástica ou fratura. Caso esta geometria seja mantida em comercialização sugere-se o acréscimo de material nesta zona.

De seguida analisou-se a nova geometria de traves, fornecida pela AJP, que irão substituir as referidas anteriormente. Para este efeito, replicaram-se as condições das simulações referidas anteriormente para a nova geometria. Após analisados os resultados da mesma, conclui-se que a nova geometria se encontra sub-dimensionada, o que, numa situação extrema, levaria à sua fratura. Para resolver este problema, sugeriu-se a alteração de algumas características da peça, bem como, a adição de material em alguns locais.

Finalmente, foram feitas algumas alterações à geometria das traves em análise. Para validação das devidas alterações foi efetuada a mesma simulação referida anteriormente em cada uma delas. Assim, foi possível observar a resposta da peça à situação considerada a cada alteração que foi efetuada. Estas alterações focaram-se na zona mais crítica da peça, uma vez que era a que possuía valores de tensão mais elevados. Com estas alterações foi possível observar que com o acréscimo de material deixaram de existir zonas que ultrapassavam a tensão de cedência do alumínio, sendo por isso um bom caminho a seguir para otimização da geometria em estudo.

Abstract

This dissertation arose from the need of the motorcycle company AJP to study and structurally optimize parts of the frame geometry of the PR3 and PR4 model that are currently being updated. In this work, the structure integrity of the aluminium beams of the frame and the tubular steel connecting the two beams were studied through numerical simulation.

As a starting point, a critical situation in which the combined weight of the motorcycle and its pilot is applied on the rear wheel rotation axis, considering a dynamic factor of 4. In order to proceed with the FEM model simulations/calculations, the load transmission generated from the application point to the motorcycle frame was studied using Autodesk Inventor.

The FEM results of the beams used in the previous frame geometry, that have been in the market for several years, were then used as a reference for the remainder of the results. After running several Abaqus simulations and studying their results, the results showed that a small region of the frame, under extreme conditions, could lead to plastic deformation or fracture. If the original geometry is to be kept on the market, the addition of material to this region is recommended.

In a second phase, the two new beam geometries in development by AJP were analysed under same conditions as the previous FEM model. The results showed that this new geometry is under dimensioned, meaning that under extreme conditions it could lead to frame fracture. In order to solve this problem, some changes to the frame geometry were suggested, as well as reinforcing critical regions.

Finally, the changes to the beam's geometry were applied to the critical regions that presented higher stress values. The FEM analysis was repeated after each change applied to this component. As a result, it was possible to understand the response variation produced by the geometry changes. With such modification and the addition of material, it was no longer possible to detect any areas that exceeded the yield strength of aluminium. Therefore, the results from the FEM analysis showed that the suggested change can improve the structural integrity of the motorcycle frame.

‘The important thing is to never stop questioning.’

Albert Einstein

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus pais por todo o apoio e suporte ao longo de todo este percurso académico, para que tenha o melhor sucesso possível no futuro.

Gostaria, também de agradecer ao meu orientador, Professor José Luís Esteves, pela sua disponibilidade e ajuda sempre que foi necessária, ao meu co-orientador, Professor Marco Parente, por todo o conhecimento que me transmitiu sobre o programa de simulação numérica *abaqus* e ao orientador da empresa, Engenheiro Miguel Oliveira, pela possibilidade de trabalhar neste trabalho de tese e pela partilha de conhecimento.

Por último, gostaria de agradecer a todos os meus amigos que fizeram parte deste percurso académico que, de uma maneira ou de outra, me ajudaram a concluir o percurso com sucesso, em particular ao James Hooton e ao Rui Ferreira pela revisão do documento.

Conteúdo

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	vii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Estrutura da tese	1
2 A empresa AJP	3
3 Estrutura do quadro em análise	9
3.1 Partes em aço	10
3.1.1 Berço do quadro e coluna de direção	10
3.1.2 Parte traseira do quadro	10
3.2 Partes em alumínio	11
3.2.1 Traves	11
3.2.2 Braço da roda traseira	13
3.2.3 Bielas	14
4 Cálculo dos esforços para o quadro	17
4.1 Situação crítica considerada	17
4.2 Modelo utilizado para cálculo dos esforços	17
4.3 Esforços transferidos para o quadro	18
5 Análise das traves do modelo antigo de quadro da PR3	21
5.1 Condições de fronteira	21
5.2 Malha utilizada	23
5.3 Resultados	24
5.3.1 Resultados trave esquerda	25
5.3.2 Resultados trave direita	26
5.4 Discussão de resultados	27
6 Análise das traves do novo modelo de quadro da PR3	29
6.1 Condições de fronteira	29
6.2 Malha utilizada	31
6.3 Resultados	33
6.3.1 Resultados trave esquerda	34
6.3.2 Resultados trave direita	37

6.4	Discussão de resultados	40
7	Alterações propostas à nova geometria	43
7.1	Primeira iteração	44
7.2	Segunda iteração	44
7.3	Terceira iteração	45
7.4	Quarta iteração	46
7.5	Quinta iteração	47
7.6	Sexta iteração	48
8	Conclusão	51
8.1	Conclusões	51
8.2	Trabalhos futuros	52
	Referências	53

Lista de Figuras

2.1	Imagem do motociclo Ariana 125.[2]	3
2.2	Imagem do motociclo Galp 50.[5]	4
2.3	Imagem do motociclo PR4.[7]	4
2.4	Imagem do motociclo PR3.[8]	5
2.5	Imagem do motociclo PR5.[9]	5
2.6	Imagem do motociclo PR7	6
2.7	Imagem do motociclo SPR 250.[10]	6
2.8	Protótipo em desenvolvimento do quadro dos modelos da PR3 e da PR4.	7
3.1	Quadro da PR3 completo.	9
3.2	Estrutura inferior do quadro em aço (berço).	10
3.3	Parte traseira do quadro.	11
3.4	Deposito com função estrutural para o novo modelo PR3[2].	11
3.5	Traves do quadro antigo da PR3. <i>a</i> - ligação do amortecedor; <i>b</i> - ligações superiores ao berço do quadro; <i>c</i> - ligações do braço da roda traseira; <i>d</i> - orifícios de montagem dos poisa-pés; <i>e</i> - ligações inferiores ao berço do quadro.	12
3.6	Traves do quadro novo da PR3.	13
3.7	Braço da roda traseira.	14
3.8	Biela de ligação ao quadro.	14
3.9	Biela de ligação ao braço da roda traseira.	15
4.1	Modelo esquemático do quadro do motociclo utilizado para calculo de esforços.	18
4.2	Análise estática efetuada ao modelo esquemático. <i>a</i> - ligação do amortecedor ao quadro; <i>b</i> - ligação do braço da roda traseira ao quadro; <i>c</i> - ligação da biela do quadro ao berço do quadro.	19
5.1	Condições de fronteira das traves antigas da PR3: <i>a</i> —encastramento; <i>b</i> , <i>c</i> —apoios laterais; <i>d</i> , <i>e</i> —apoios laterais e aplicação de forças; <i>f</i> —fixo.	22
5.2	Posição de aplicação da força respetiva ao peso do piloto (ponto <i>a</i>).	22
5.3	Definição da forma do elemento de malha.	23
5.4	Definição do tipo de elemento de malha.	23
5.5	Tamanho global dos elementos e aproximação em zonas curvas.	24
5.6	Malhas utilizadas na análise das traves do modelo antigo do quadro da PR3.	24
5.7	Vista exterior da trave esquerda antiga.	25
5.8	Vista interior da trave esquerda antiga.	25
5.9	Vista interior da zona inferior da trave esquerda antiga — zona critica da peça.	26
5.10	Vista exterior da trave direita antiga.	26
5.11	Vista interior da trave direita antiga.	27
5.12	Vista interior da zona inferior da trave direita antiga — zona crítica da peça.	27

6.1	Condições de fronteira das traves novas da PR3: a —encastramento; b, c —apoios laterais; d, e —apoios laterais e aplicação de forças; f —fixo.	30
6.2	Posição de aplicação das forças respetivas ao peso do piloto (ponto a).	30
6.3	Tamanho global dos elementos e aproximação em zonas curvas.	31
6.4	Definição da forma dos elementos utilizados.	31
6.5	Definição do tipo de elemento de malha.	32
6.6	Malha gerada nas peças soldadas em aço.	32
6.7	Malha gerada nas traves de alumínio.	33
6.8	Superfícies unidas artificialmente através da ferramenta <i>tie</i> da trave nova do lado direito.	33
6.9	Vista exterior da nova trave esquerda.	34
6.10	Vista interior da nova trave esquerda.	34
6.11	Vista exterior da parte inferior da nova trave esquerda.	35
6.12	Vista exterior da parte inferior da nova trave esquerda - outro ângulo.	35
6.13	Vista interior da parte inferior da nova trave esquerda.	36
6.14	Vista exterior do triângulo de fixação do suporte do amortecedor da nova trave esquerda.	36
6.15	Vista interior do triângulo de fixação do suporte do amortecedor da nova trave esquerda.	37
6.16	Vista exterior da nova trave direita.	37
6.17	Vista interior da nova trave direita.	38
6.18	Vista exterior da zona inferior da nova trave direita.	38
6.19	Vista exterior da zona inferior da nova trave direita - zona mais crítica.	38
6.20	Vista exterior da zona inferior da nova trave direita - raios de concordância de suportes para aperto de parafusos.	39
6.21	Vista interior da zona inferior da nova trave direita.	39
6.22	Vista exterior do triângulo de fixação do amortecedor da nova trave direita.	40
6.23	Vista interior do triângulo de fixação do amortecedor da nova trave direita.	40
7.1	Zona mais crítica da geometria original da trave direita	43
7.2	Primeira iteração de modificação da trave direita.	44
7.3	Resultados da primeira iteração de modificação da trave direita.	44
7.4	Segunda iteração de modificação da trave direita.	45
7.5	Resultados da segunda iteração de modificação da trave direita.	45
7.6	Terceira iteração de modificação da trave direita.	46
7.7	Resultados da terceira iteração de modificação da trave direita.	46
7.8	Quarta iteração de modificação da trave direita.	47
7.9	Resultados da quarta iteração de modificação da trave direita.	47
7.10	Quinta iteração de modificação da trave direita.	48
7.11	Resultados da quinta iteração de modificação da trave direita.	48
7.12	Sexta iteração de modificação da trave direita.	49
7.13	Resultados da sexta iteração de modificação da trave direita.	49

Lista de Tabelas

- 4.1 Esforços transferidos para o quadro, aplicando 7000 N ao eixo da roda traseira. 19

Introdução

No âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e tendo a empresa AJP necessidade de um estudo estrutural de novas geometrias de peças para a atualização do quadro em desenvolvimento dos modelos de motociclo PR3 e PR4 da marca, foi proposta a análise de parte do quadro a ser alterado através do *software* de simulação numérica *abaqus* [1]. As peças do quadro a serem analisadas nesta dissertação serão as traves e a peça tubular de ligação das duas traves, mostradas no capítulo 3.2.1.

1.1 Objetivos

O objetivo desta dissertação é o estudo e otimização da geometria do novo modelo de traves do quadro em desenvolvimento pela empresa AJP.

Com este objetivo em mente, será feita uma análise da geometria antiga desta peça, que foi comercializada nos últimos dez anos com bastante sucesso, segundo a situação critica considerada (receção de um salto) e, posteriormente, submeter-se a nova geometria à mesma análise. Após a análise separada de ambas as geometrias serão feitas propostas de melhoria da nova geometria nas zonas que se revelarem mais frágeis e apresentadas algumas soluções.

1.2 Estrutura da tese

Neste capítulo é feito um pequeno enquadramento da tese e os objetivos da mesma.

No capítulo 2 é feita uma pequena descrição histórica da empresa, com os seus principais marcos.

No capítulo 3 é descrita a estrutura do quadro em análise para referencia ao longo da tese e para melhor enquadrar a presente tese.

No capítulo 4 é estudada a situação critica considerada para análise da estrutura do quadro.

No capítulo 5 é feita a análise da geometria antiga das traves em análise nesta dissertação.

No capítulo 6 é feita a análise da geometria nova das traves em análise nesta dissertação.

No capítulo 7 são feitas algumas tentativas de correção das zonas críticas identificadas no capítulo 6 e posterior análise.

Finalmente são apresentadas as conclusões desta dissertação, bem como algumas sugestões para se poder dar continuidade a este trabalho e melhor otimização das peças em análise.

A empresa AJP

A empresa AJP Motos, mais conhecida como AJP, foi fundada em 1987 pelos sócios António Pinto e Jorge Pinto. Tendo iniciado a actividade como uma oficina de reparações e modificações de motociclos, lançou o seu primeiro motociclo em 1990, a Ariana 125 (Figura 2.1) [2–4].



Figura 2.1: Imagem do motociclo Ariana 125.[2]

Em 1991, a AJP estabeleceu uma parceria com a Petrogal (Galp Energia atualmente), de onde surgiu o modelo AJP Galp 50 (Figura 2.2), alguns óleos sintéticos para motores a dois tempos e testes em gasolinas aditivadas sem chumbo. A marca tem participado desde esta altura no campeonato nacional de enduro, conquistando várias vitórias, nomeadamente os títulos entre 1996 e 2000. O modelo Galp 50 foi o primeiro modelo da marca a utilizar um braço oscilante de uma só peça, obtido por fundição em areia, solução que ainda é utilizada nos modelos atuais da marca. Até então, os braços oscilantes eram obtidos por soldadura de várias peças, o que implicava um processo mais demorado e dispendioso [3; 4].



Figura 2.2: Imagem do motociclo Galp 50.[5]

Em 2001, a AJP lançou a AJP PR4 125cc (Figura 2.3), que se tornou o primeiro modelo da marca a ser exportado, para o Reino Unido, Alemanha e França. Neste modelo a AJP apresentou outra característica inovadora, desta vez com o depósito de combustível situado debaixo do assento do piloto, característica que também se encontra nos modelos atuais, o que permite que o centro de gravidade do motociclo se encontre a uma altura mais baixa, possibilitando um melhor comportamento dinâmico do motociclo [4; 6].



Figura 2.3: Imagem do motociclo PR4.[7]

Em 2003, a empresa mudou-se para uma nova fábrica em Lousada e, no ano seguinte lançou uma nova versão da PR4, desta vez com um motor de 200cc. Este modelo, com os mesmos componentes da versão de 125cc, permitiu à empresa expandir os seus negócios para Espanha, Polónia, Itália e Grécia [4].

Em 2007, a AJP lançou um novo modelo, a PR3 200cc (Figura 2.4), com o mesmo motor que a PR4, mas com um novo conceito de chassis, o que levou a uma mota de peso bastante inferior às anteriormente apresentadas pela marca. Após uma atualização, a PR3 tornou-se o motociclo de enduro com motor a quatro tempos mais leve do mundo [4; 6].



Figura 2.4: Imagem do motociclo PR3.[8]

Após a homologação de novas versões da PR3, versão de 125cc no final de 2008 e versão de 200cc no início de 2009, as vendas da marca subiram consideravelmente, permitindo o desenvolvimento de um novo modelo, a PR5 (Figura 2.5) com motor de 250cc, no final de 2009. Com este modelo a empresa iniciou exportação para o Japão e para o Brasil [4; 6].



Figura 2.5: Imagem do motociclo PR5.[9]

Após o lançamento da PR5, a AJP lançou a PR7 (Figura 2.6), outro motociclo vocacionado para o trail. Com este modelo, a AJP trouxe para o mercado uma mota com motor monocilíndrico de 600cc e uma mota mais leve do que os modelos concorrentes.



Figura 2.6: Imagem do motociclo PR7

Mais recentemente, a marca AJP lançou os motociclos de enduro SPR 250, SPR 310 e SPR 510 (Figura 2.7) que partilham os mesmos elementos estruturais. Nestes modelos encontra-se a última novidade da empresa: um depósito de combustível com função estrutural que foi estudado no âmbito da tese de mestrado do engenheiro Luís Peixoto [2].



Figura 2.7: Imagem do motociclo SPR 250.[10]

Actualmente encontram-se em desenvolvimento os novos modelos da PR3 (Figura 2.8) e da PR4, que vão contar com alterações no *design* de quadro, bem como o mesmo depósito estrutural referido anteriormente, tendo a marca com objetivo aplicar esta filosofia de depósito a todos os modelos a serem lançados no futuro. É no decorrer do desenvolvimento destes dois últimos modelos que esta dissertação se insere, uma vez que as traves, peça do quadro que será estudada, serão partilhadas por ambos os modelos.



Figura 2.8: Protótipo em desenvolvimento do quadro dos modelos da PR3 e da PR4.

Estrutura do quadro em análise

Desde meados do século XIX os quadros dos motocicletos têm vindo a evoluir consideravelmente, de uma bicicleta adaptada para incorporar um motor a vapor até à enorme variedade de motocicletos que existem hoje em dia para vários tipos de utilização possível, como referido na tese de doutoramento do engenheiro Miguel Oliveira [3] e na tese de mestrado do engenheiro Carlos Vieira [11].

Para uma melhor compreensão da parte do quadro analisada nesta dissertação, neste capítulo, será efetuada uma análise à estrutura do motociclo em estudo.

O quadro desenvolvido pela empresa AJP é composto por várias partes, desenhado tendo em conta a experiência da mesma no mercado de motocicletos todo-o-terreno. Usando uma combinação entre partes fabricadas em alumínio e partes fabricadas em aço, a empresa consegue um quadro mais leve, mantendo a sua robustez e um baixo custo de produção. De notar, que neste quadro, devido à forma como o motor se encontra montado, este também apresenta uma função estrutural no mesmo. Assim, a empresa consegue um motociclo com bom desempenho, podendo competir com várias marcas com mais experiência nesta área.

De seguida são apresentados os principais componentes do quadro do modelo antigo da PR3 juntamente com as novas geometrias que as irão substituir, caso se aplique.

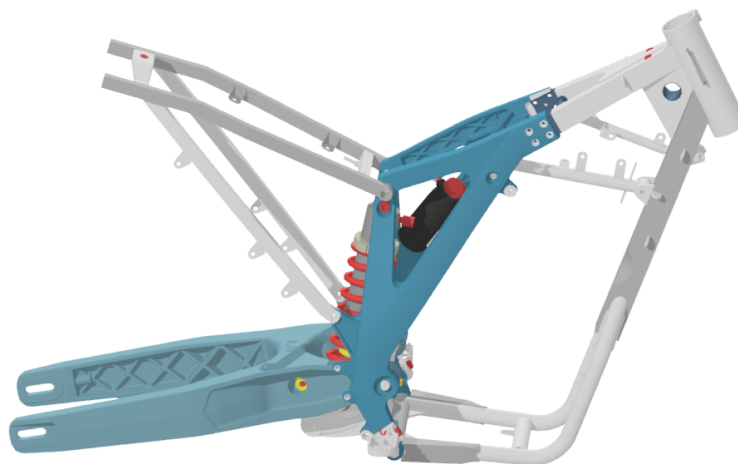


Figura 3.1: Quadro da PR3 completo.

3.1 Partes em aço

Nesta secção serão expostos os dois componentes do quadro produzidos em aço. A liga de aço usada nestes componentes foi a liga EN 10305-3 com 235 MPa de valor de tensão de cedência.

3.1.1 Berço do quadro e coluna de direção

Esta peça, mostrada na Figura 3.2, é formada por várias peças em aço soldadas entre si, constitui a estrutura base do quadro do motociclo.

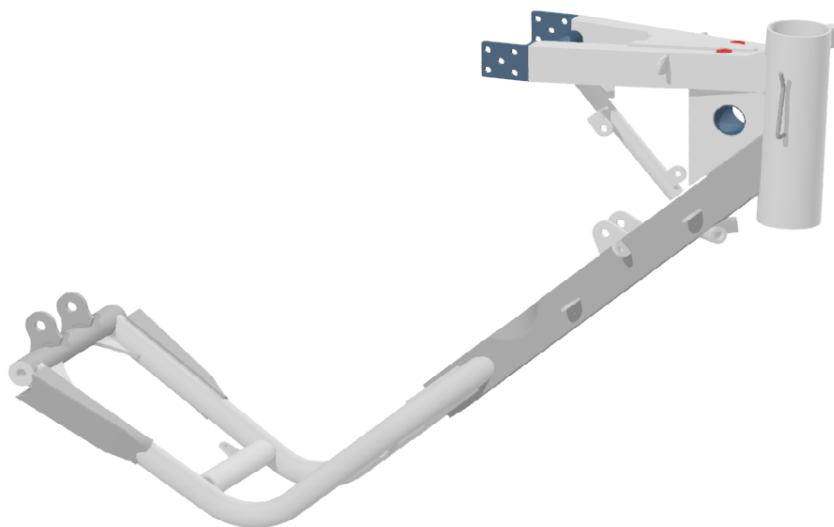


Figura 3.2: Estrutura inferior do quadro em aço (berço).

Junto à coluna de direção, encontra-se uma estrutura de reforço, em chapa. Apesar de ser feito de folha de metal fina, esta zona do quadro necessita de rigidez suficiente para suportar os esforços envolvidos na utilização de um motociclo todo-o-terreno. A coluna de direção é um tubo simples, onde será montada a forquilha e suspensão da roda da frente do motociclo.

O motor do motociclo será montado no interior desta estrutura sobre os tubos paralelos da parte inferior e apoiado no tubo quadrangular que conecta à coluna de direção.

Na parte inferior desta peça conecta-se a biela do quadro e a parte inferior das traves em alumínio do quadro. Estas últimas, conectam-se através das sua parte superior aos tubos quadrangulares localizados na parte superior da estrutura.

De notar que nesta estrutura todos os tubos utilizados são ocos, o que permite obter um peso reduzido, mantendo uma boa rigidez estrutural.

3.1.2 Parte traseira do quadro

A parte traseira do modelo antigo de quadro, mostrada na Figura 3.3, também é constituído por várias peças mais pequenas em aço, soldadas entre si. Esta estrutura acomoda no seu interior o depósito de combustível, de modo a que este se encontre o mais próximo possível do centro de massa do conjunto *motociclo + piloto*. Na parte de cima desta estrutura é montado o banco do motociclo.

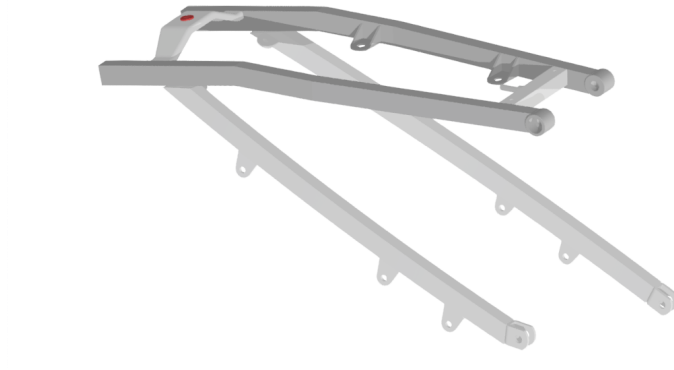


Figura 3.3: Parte traseira do quadro.

No modelo novo de quadro, esta estrutura deixará de existir, sendo substituída pelo depósito mostrado na Figura 3.4. Este depósito, estudado na tese do então aluno Luís Peixoto [2] é fabricado em polímero (PA – poliamida) através de roto-moldagem e, uma vez que a parte traseira do quadro do modelo antigo será eliminada, o depósito passa a desempenhar, também, uma função estrutural. Neste caso, o banco do piloto do motociclo será diretamente montado no depósito.

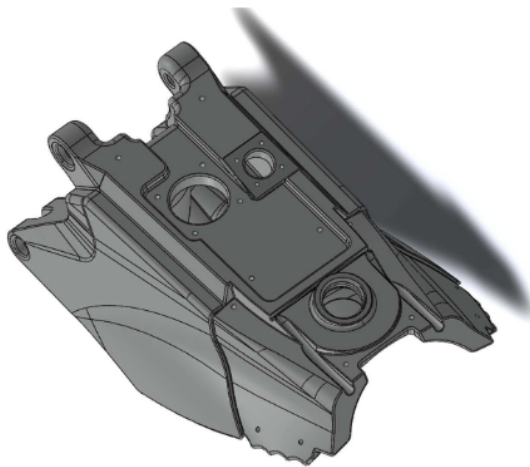


Figura 3.4: Depósito com função estrutural para o novo modelo PR3[2].

3.2 Partes em alumínio

Nesta secção serão mostradas as peças feitas em alumínio. A liga de alumínio utilizada é a AlSi7Mg0,3 (Calypso 67B), cujo valor de tensão de cedência é de 162 MPa.

3.2.1 Traves

Na Figura 3.5 podemos ver as traves do modelo antigo do motociclo, que serão as primeiras peças a ser estudadas no decorrer desta dissertação. Estas traves são fabricadas através do processo fundição em areia e ligam-se ao berço do quadro (referido na secção 3.1.1)

em duas partes: na parte superior e na parte inferior da mesma (*b* e *e* na Figura 3.5, respectivamente).

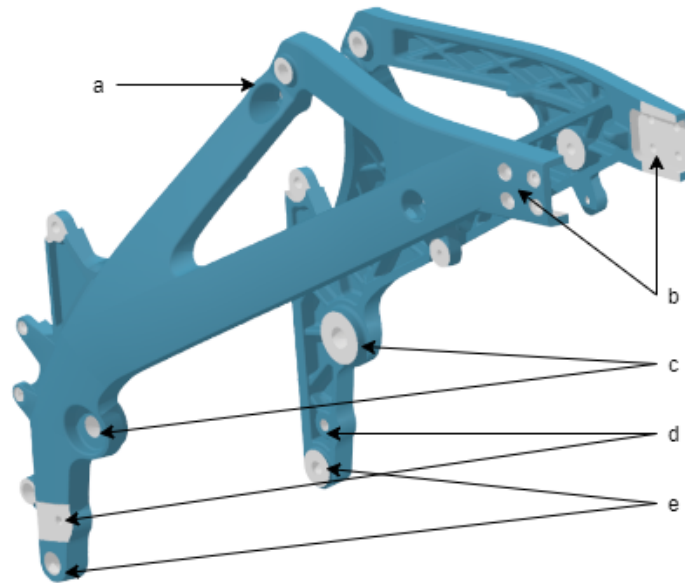


Figura 3.5: Traves do quadro antigo da PR3. *a* - ligação do amortecedor; *b* - ligações superiores ao berço do quadro; *c* - ligações do braço da roda traseira; *d* - orifícios de montagem dos poisa-pés; *e* - ligações inferiores ao berço do quadro.

A esta peça ligam-se, também, outros componentes importantes do quadro, como o braço da roda traseira e o amortecedor traseiro. É nesta peça que também se encontram montados os poisa-pés.

O modelo de traves mostrado anteriormente será substituído pelo modelo mostrado na Figura 3.6. Ao contrário do modelo antigo, que é formado por uma única peça em alumínio, o novo modelo será formado por uma peça em alumínio, também feita a partir de moldação em areia, na qual será aparafusada um conjunto de peças soldadas feitas em aço, como se pode ver na Figura 3.6. Esta estrutura em aço será feita na mesma liga das peças em aço referidas anteriormente. É nesta estrutura triangular em aço onde se irá ligar o amortecedor.



Figura 3.6: Traves do quadro novo da PR3.

3.2.2 Braço da roda traseira

O braço da roda traseira é a estrutura onde a roda traseira do motociclo é montada. Este tem de ser capaz de aguentar vários tipos de impactos derivados dos vários contextos e tipos de terrenos em que este motociclo é utilizado. É também fabricado em alumínio através de fundição em areia.

O braço traseiro mostrado na Figura 3.7 é referente ao modelo antigo de quadro da PR3. Este modelo irá também ser atualizado para se aproximar mais a outros modelos da marca, nos quais o braço traseiro apresenta uma estrutura oca.

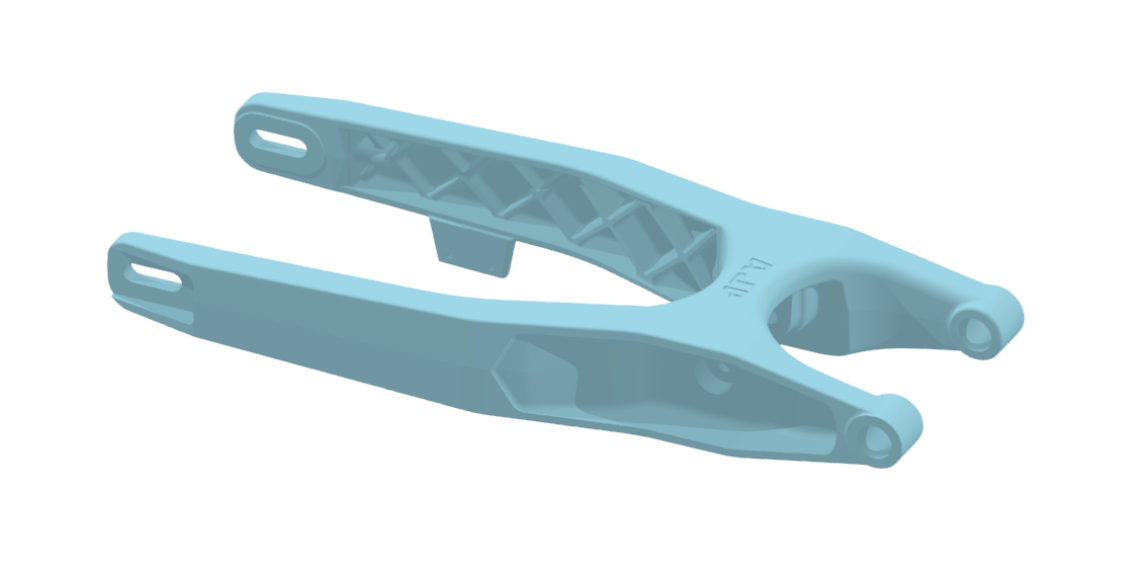


Figura 3.7: Braço da roda traseira.

O braço da roda traseira é a estrutura onde a roda traseira do motociclo é montada. Este tem de ser capaz de suportar vários tipos de impactos derivados dos vários contextos e variedades de relevos nos quais que este motociclo é utilizado. É também fabricado em alumínio através de fundição em areia.

O braço traseiro mostrado na Figura 3.7 é referente ao modelo antigo de quadro da PR3. Este modelo irá também ser atualizado para se aproximar mais a outros modelos da marca, nos quais o braço traseiro apresenta uma estrutura oca.

3.2.3 Bielas

As bielas deste quadro (figuras 3.8 e 3.9) são, também, fabricadas através de fundição em areia e são utilizadas como uma estrutura de ligação entre o braço da roda traseira e o berço do quadro, na qual o amortecedor traseiro se conecta.

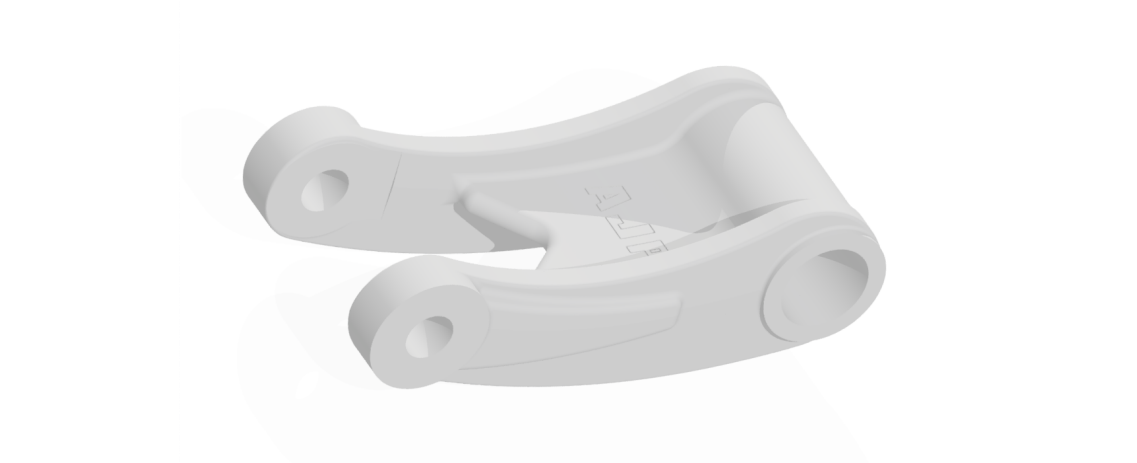


Figura 3.8: Biela de ligação ao quadro.



Figura 3.9: Biela de ligação ao braço da roda traseira.

Cálculo dos esforços para o quadro

Neste capítulo será descrita a forma como foram calculados os esforços máximos sentidos pelo quadro e a situação em que este acontece.

4.1 Situação crítica considerada

Para a análise estrutural das traves do modelo da PR3 em comercialização pela AJP, foi necessário analisar os esforços mais elevados aos quais as traves estariam sujeitas. Para isso, considerou-se como situação para análise a situação extrema para o qual todo o peso do conjunto, motociclo mais condutor, estaria totalmente aplicado na roda traseira, aquando da receção de um salto.

Considerou-se um utilizador com 75 kg de peso e 100 kg para o peso do motociclo. Utilizou-se, também, um fator dinâmico de 4 para se efetuar uma aproximação estática aos esforços dinâmicos mais extremos sentidos durante a utilização do motociclo.

Assim, a força a aplicar no braço da roda traseira será:

$$\begin{aligned}\text{Força aplicada} &= (\text{Peso do motociclo} + \text{Peso do condutor}) \times \text{Fator dinâmico} \times g \\ \text{Força aplicada} &= (100 + 75) \times 4 \times 9,8 = 6860 \text{ N} \approx 7000 \text{ N} \\ \text{Onde } g &\text{ é a aceleração gravítica terrestre.}\end{aligned}\tag{4.1}$$

Aplicou-se a força de 7000 N no braço da roda traseira, no eixo de rotação da mesma. Para esta situação, devido aos esforços elevados envolvidos, considerou-se o amortecedor totalmente comprimido, tendo o mesmo sido substituído por uma barra rígida para simular a passagem de esforços quando se encontra comprimido.

4.2 Modelo utilizado para cálculo dos esforços

Para o cálculo dos esforços transmitidos pelo conjunto braço traseiro, bielas e amortecedor à parte central do quadro recorreu-se a uma análise estática no *software inventor*[12]. Para esta análise tentou-se usar a geometria original do motociclo em análise, contudo, esta geometria era demasiado complexa e o programa em uso revelou-se incapaz de gerar uma malha para efetuar cálculos estáticos nesta geometria. Para contornar este problema resolveu-se criar uma geometria mais simples usando o mesmo programa.

Nesta geometria (Figura 4.1), conservaram-se todas as distâncias entre os diferentes eixos da geometria original e o número de partes que constituem o quadro, tendo sido apenas alterada a largura do mesmo e a forma dos componentes. Assim, pode-se calcular

os esforços de contacto entre as várias partes do quadro de uma forma mais rápida e numa geometria em que o programa é capaz de gerar um malha para fazer os cálculos necessários.

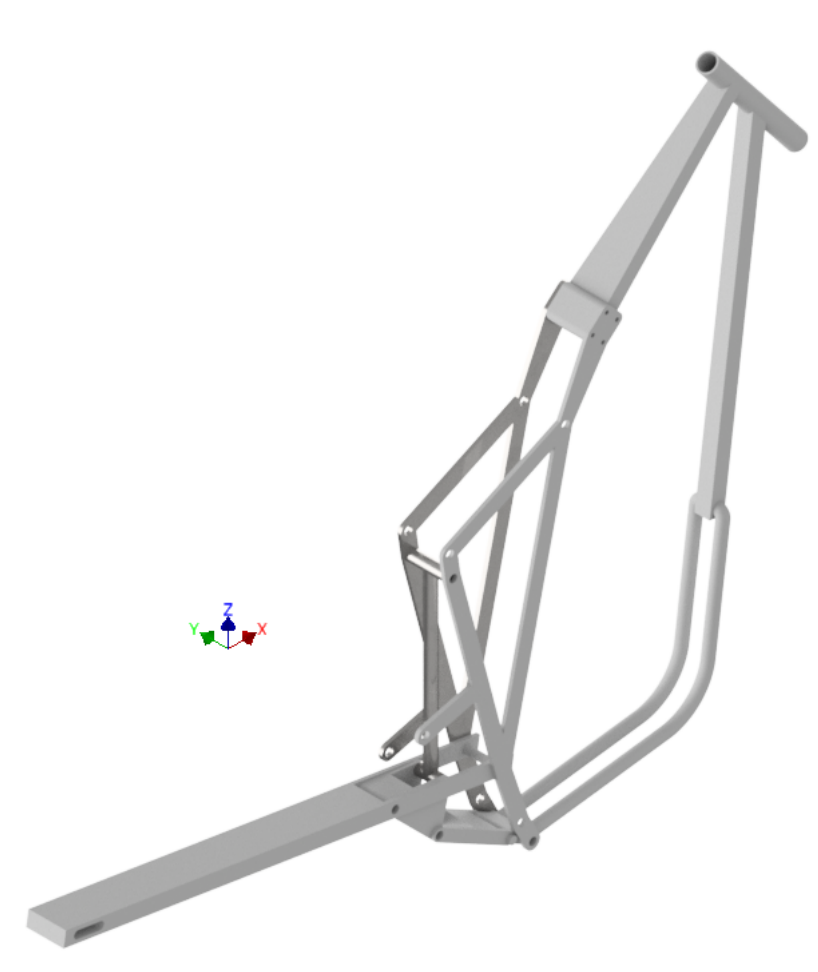


Figura 4.1: Modelo esquemático do quadro do motociclo utilizado para calculo de esforços.

4.3 Esforços transferidos para o quadro

Utilizando o modelo da Figura 4.1, criou-se a simulação estática mostrada na Figura 4.2, que calcula os esforços transferidos da parte traseira do motociclo para as restantes partes do quadro. Analisando a Figura 4.2 podemos observar a ligação do amortecedor às traves, identificada com a letra *a*, a ligação do braço da roda traseira às traves, identificada com a letra *b* e a ligação das bielas do amortecedor ao berço do quadro, identificada pela letra *c*. Podemos também observar como foi aplicada a força de 7000 N ao centro do eixo da roda traseira, como referido anteriormente.

Para correr a simulação referida, analisou-se apenas a parte traseira do veículo, sendo o resto do veículo ignorado, como se pode observar na Figura 4.2. Assim, nos pontos de ligação interiores do quadro, referidos anteriormente, criaram-se condições de fronteira, que fixam os eixos respectivos na posição de ligação ao resto do quadro, bloqueando os deslocamentos segundo os três eixos cartesianos mas permitindo a rotação. Da mesma forma as ligações intermédias entre as peças permitem que as mesmas rodem entre elas segundo o eixo definido, aproximando a simulação às condições reais de utilização.

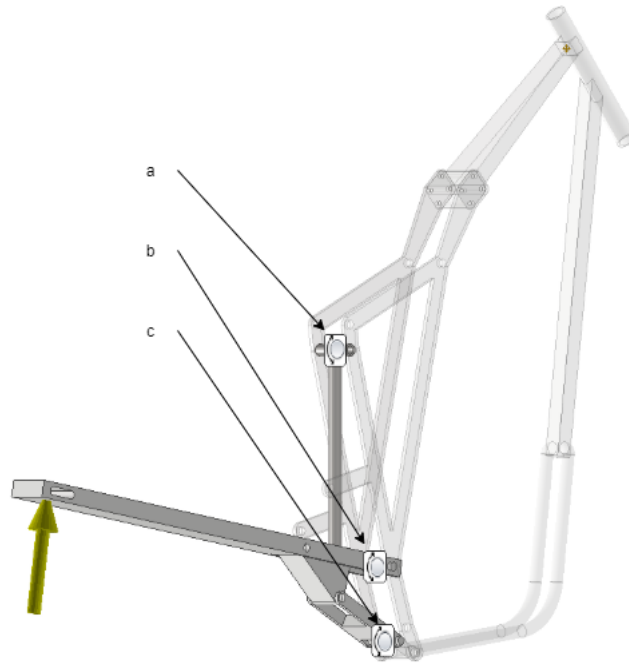


Figura 4.2: Análise estática efetuada ao modelo esquemático. *a* - ligação do amortecedor ao quadro; *b* - ligação do braço da roda traseira ao quadro; *c* - ligação da biela do quadro ao berço do quadro.

Assim, nesta simulação, os esforços transferidos para o restante quadro são os apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Esforços transferidos para o quadro, aplicando 7000 N ao eixo da roda traseira.

Ligação	Força [N]			
	Magnitude	F_x	F_y	F_z
<i>a</i>	14030,2	-73,3707	0	-14030
<i>b</i>	45482,5	-37087,7	0	26327,9
<i>c</i>	40918,4	36139,5	0	-19189,9

Análise das traves do modelo antigo de quadro da PR3

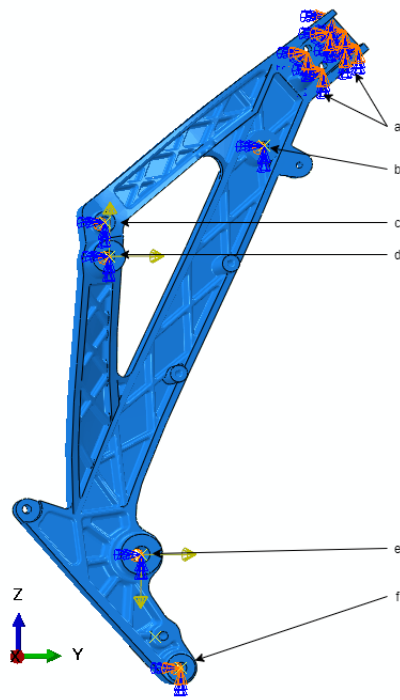
Neste capítulo serão mostradas as condições de fronteira utilizadas para a simulação das traves antigas da moto PR3, bem como a forma de obtenção da malha utilizada na análise das mesmas. De seguida serão mostrados os resultados das simulações no *software abaqus* [1] feitos às traves antigas do quadro da moto PR3. No final do mesmo será feito um comentário aos resultados obtidos.

5.1 Condições de fronteira

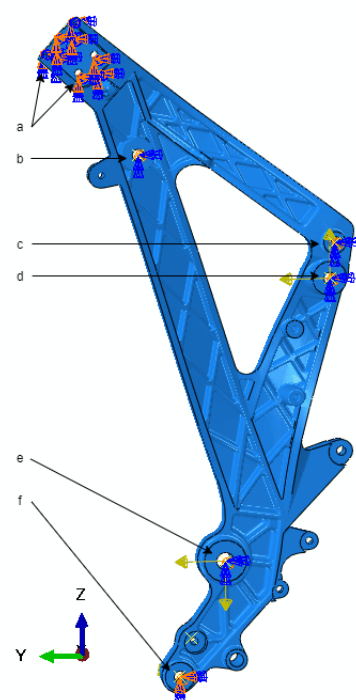
Na Figura 5.1 podemos ver as condições de fronteira aplicadas às traves da geometria antiga do modelo em análise nesta tese. Pela letra *a* temos identificada a superfície furada que está encastrada. Pelas letras *b, c, d, e* temos identificados eixos das peças que têm conexões à peça oposta, pelo que nestas 4 condições de fronteira se bloqueou o deslocamento segundo *x* e as rotações segundo *y* e *z*, de forma a evitar o empenamento da peça, de forma mais aproximada ao que acontece na realidade. Na condição de fronteira *f* bloqueou-se o deslocamento segundo todos os eixos cartesianos e as rotações segundo *y* e *z*, apenas se permitindo rotação da peça segundo o eixo *x*.

Na Figura 5.2, identificado pela letra *a*, podemos ver a posição de colocação dos poisa-pés do motociclo.

Para além das condições de fronteira referidas anteriormente, nas figuras 5.1 e 5.2 podem-se ver aplicadas as forças calculadas no capítulo 4. Na imagem 5.1 podemos ver aplicadas duas forças no ponto identificado pela letra *d*, correspondente ao esforço transferido pelo amortecedor, sendo aplicado na direção do eixo *y* 37 N e segundo o eixo *z* 7015 N. No ponto *e* da Figura 5.1 são aplicados os esforços referentes ao eixo de rotação do braço da roda traseira, cujos valores são 18543 N segundo o eixo *y* e -13164 N segundo o eixo *z*. Os esforços anteriormente apresentados são metade dos apresentados no capítulo anterior uma vez que se simulam as duas traves separadamente. Nos apoios dos pés representados na Figura 5.2 pela letra *a*, foram aplicados segundo a direção mostrada na imagem 1470 N, que é resultado do coeficiente de segurança de 4 aplicado ao peso do piloto e dividido pelas duas traves do quadro.

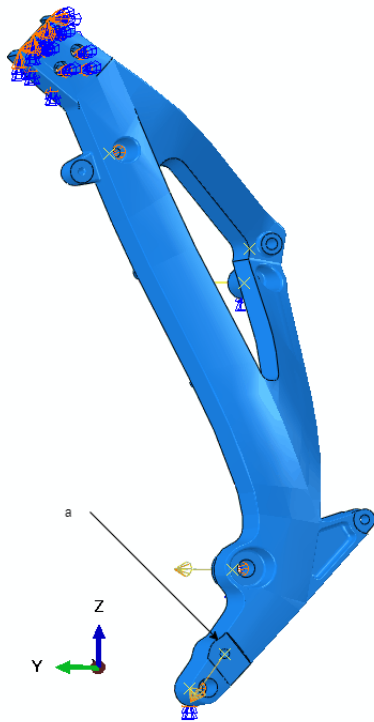


(a) Trave esquerda.

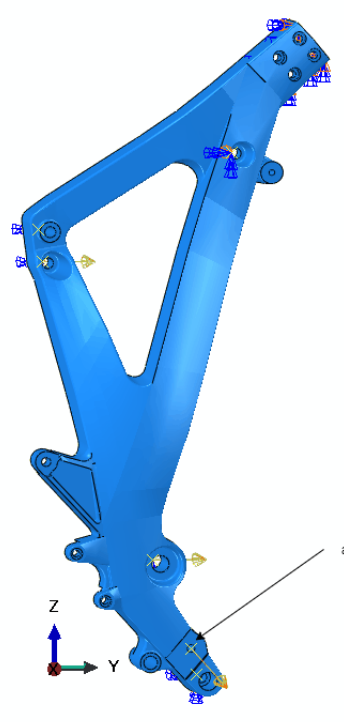


(b) Trave Direita.

Figura 5.1: Condições de fronteira das traves antigas da PR3: *a*—encastramento; *b, c*—apoios laterais; *d, e*—apoios laterais e aplicação de forças; *f*—fixo.



(a) Trave esquerda.



(b) Trave direita.

Figura 5.2: Posição de aplicação da força respectiva ao peso do piloto (ponto *a*).

5.2 Malha utilizada

Para análise das traves antigas do motociclo optou-se pela utilização de elementos tetraédricos (Figura 5.3), por serem os únicos capazes de se adaptar à complexa geometria das peças em estudo, quadráticos com formulação mista (Figura 5.4) e melhoria na visualização de tensões de superfície, para se obter resultados mais fáceis de interpretar. Após algum refinamento da malha optou-se por usar elementos com tamanho global de 3 (Figura 5.5).

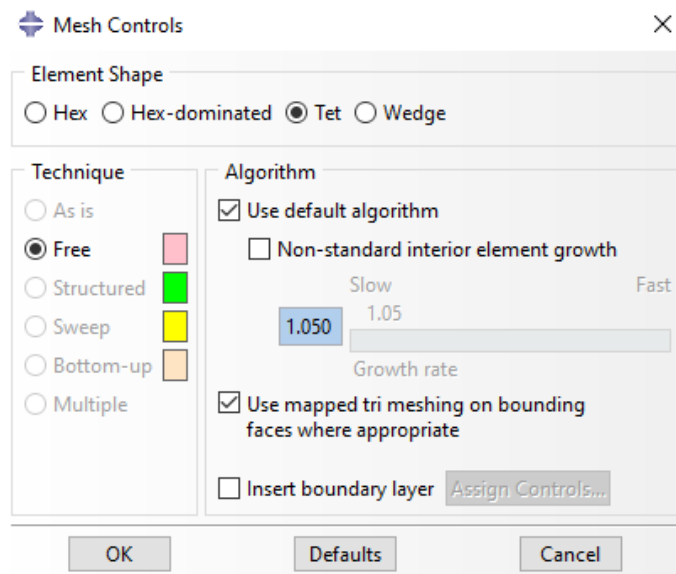


Figura 5.3: Definição da forma do elemento de malha.

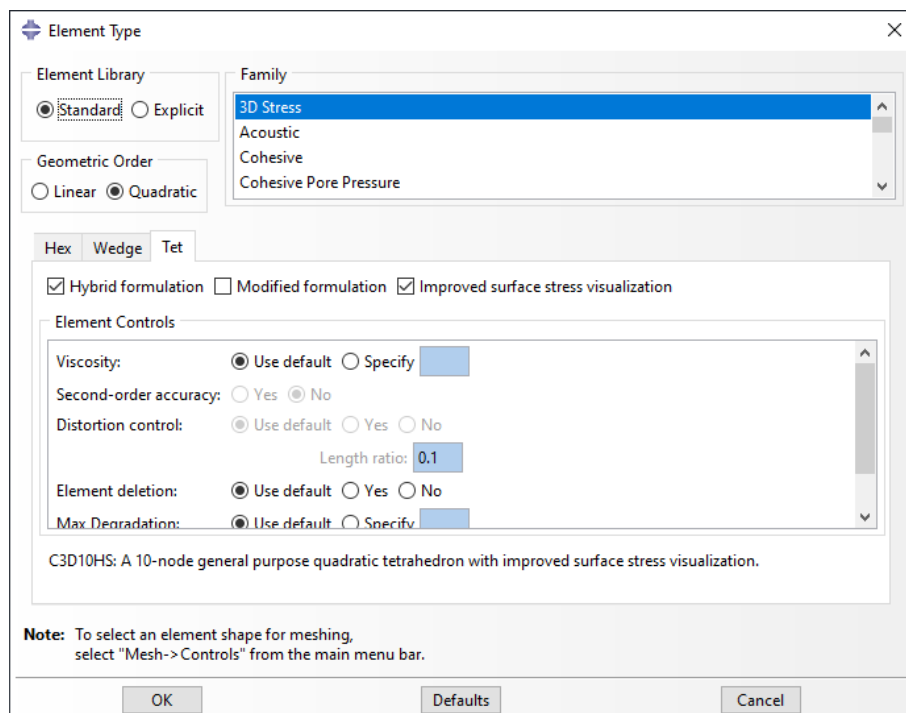


Figura 5.4: Definição do tipo de elemento de malha.

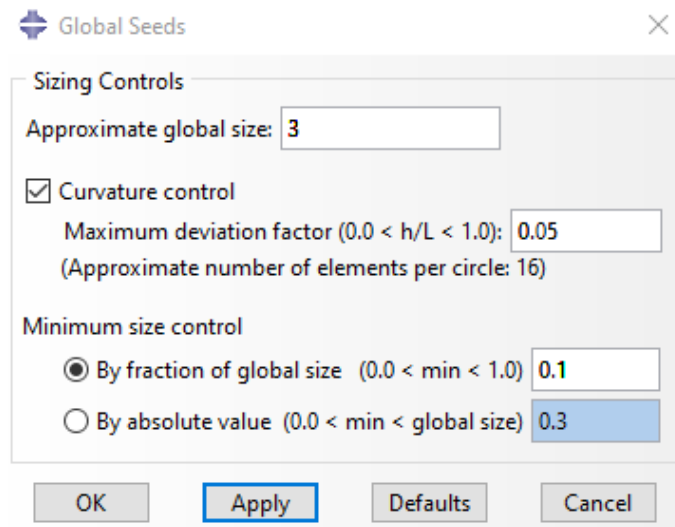


Figura 5.5: Tamanho global dos elementos e aproximação em zonas curvas.

Assim, para a análise das traves do modelo antigo do quadro da PR3 obtiveram-se as malhas mostradas na Figura 5.6. Para a trave esquerda foi obtida uma malha com 940264 nós e 630699 elementos do tipo C3D10HS. Para a trave direita foi obtida uma malha com 1091006 nós e 733788 elementos também do tipo C3D10HS.

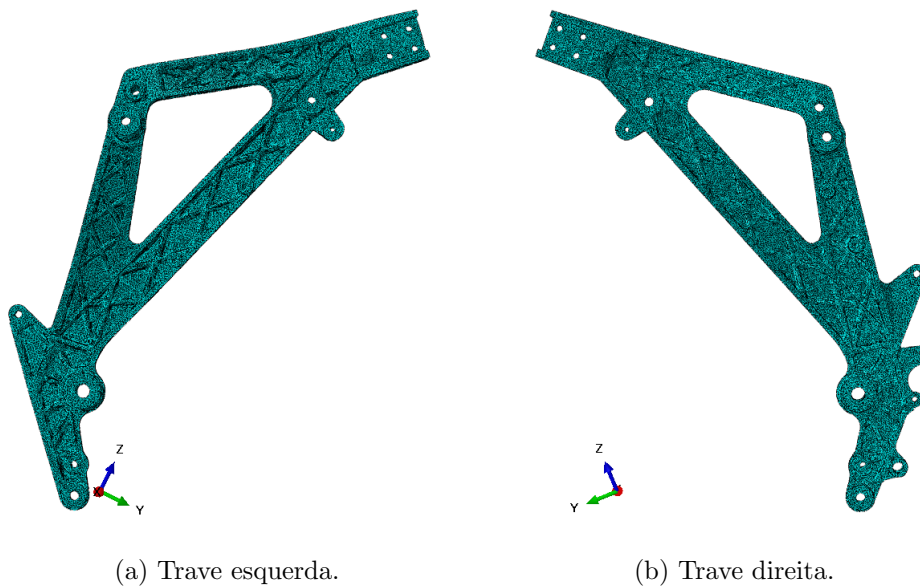


Figura 5.6: Malhas utilizadas na análise das traves do modelo antigo do quadro da PR3.

5.3 Resultados

Nesta secção são mostradas imagens dos resultados obtidos após as simulações para as traves da geometria antiga da mota PR3. Todos os resultados de simulações aqui apresentados apresentam um limite superior de tensão de 162 MPa por ser o valor da tensão de cedência da liga utilizada para o fabrico das traves em alumínio, a Calypso 67 B. Assim, para análise dos resultados obtidos, as regiões que se encontram a vermelho estão no

limiar deste valor, contudo não o ultrapassaram. Já as regiões apresentadas a cinzento, ultrapassam este limite.

5.3.1 Resultados trave esquerda

Na figuras 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam-se os resultados da simulação à trave o lado esquerdo da geometria antiga, sendo que na Figura 5.9 se mostra em pormenor a zona mais critica da mesma.

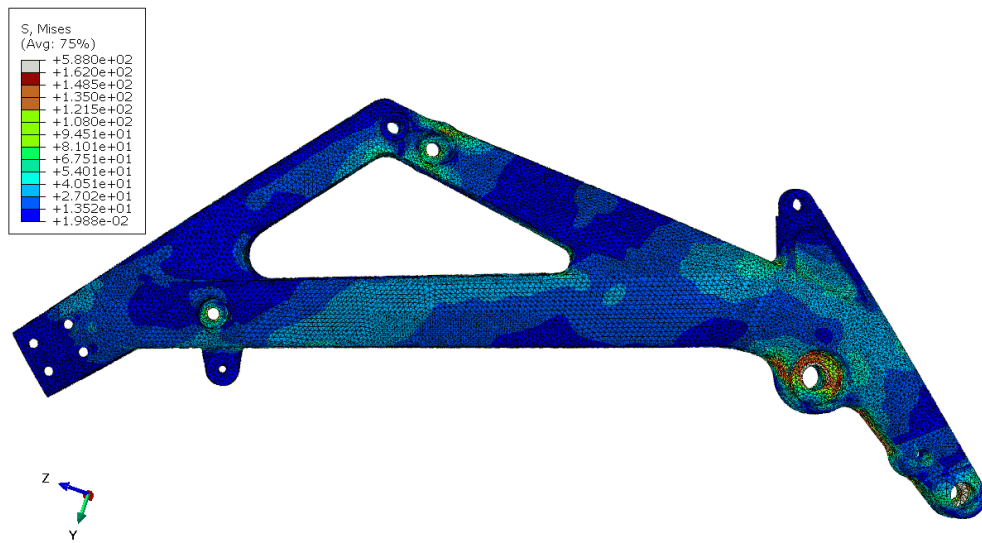


Figura 5.7: Vista exterior da trave esquerda antiga.

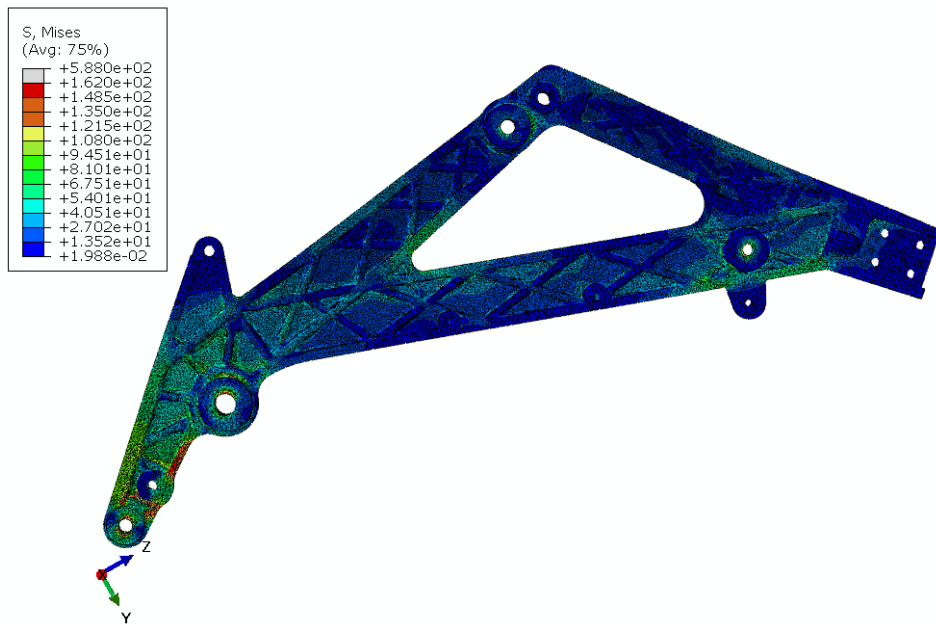


Figura 5.8: Vista interior da trave esquerda antiga.

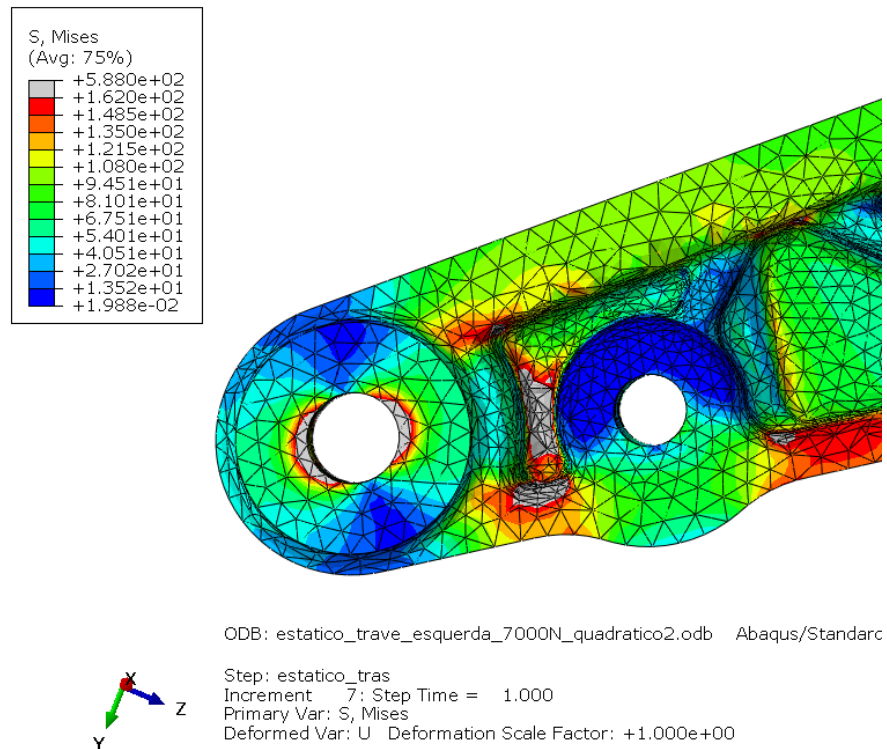


Figura 5.9: Vista interior da zona inferior da trave esquerda antiga — zona critica da peça.

5.3.2 Resultados trave direita

Na figuras 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam-se os resultados da simulação à trave o lado direito da geometria antiga, sendo que na Figura 5.12 se mostra em pormenor a zona mais critica da mesma.

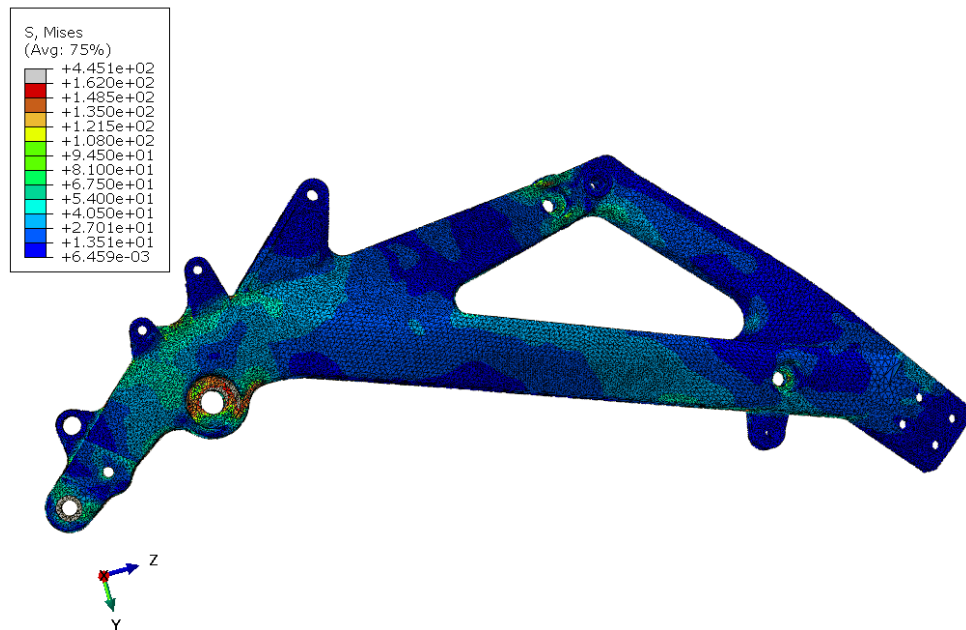


Figura 5.10: Vista exterior da trave direita antiga.

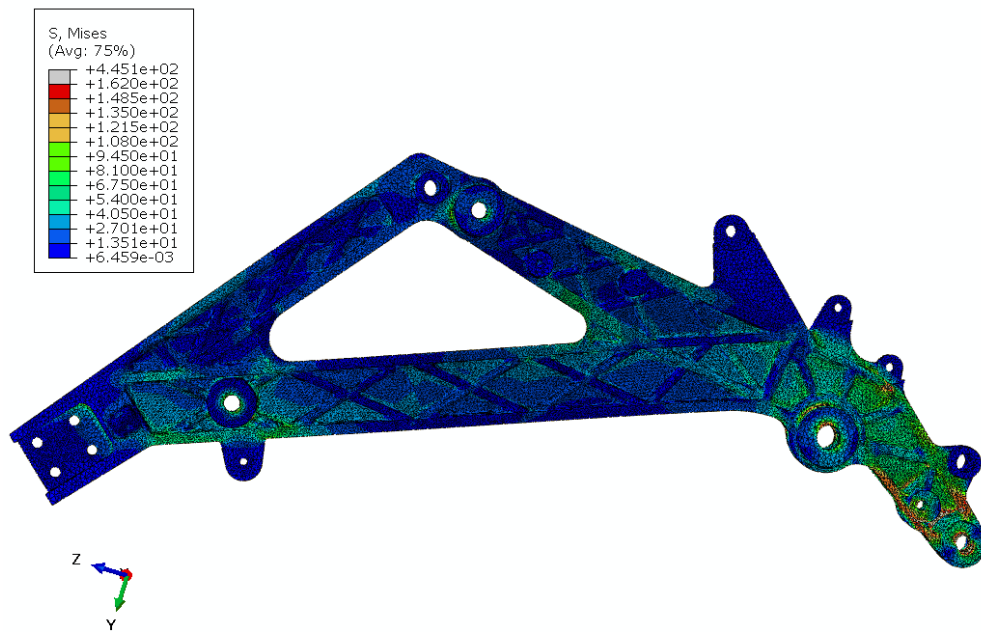


Figura 5.11: Vista interior da trave direita antiga.

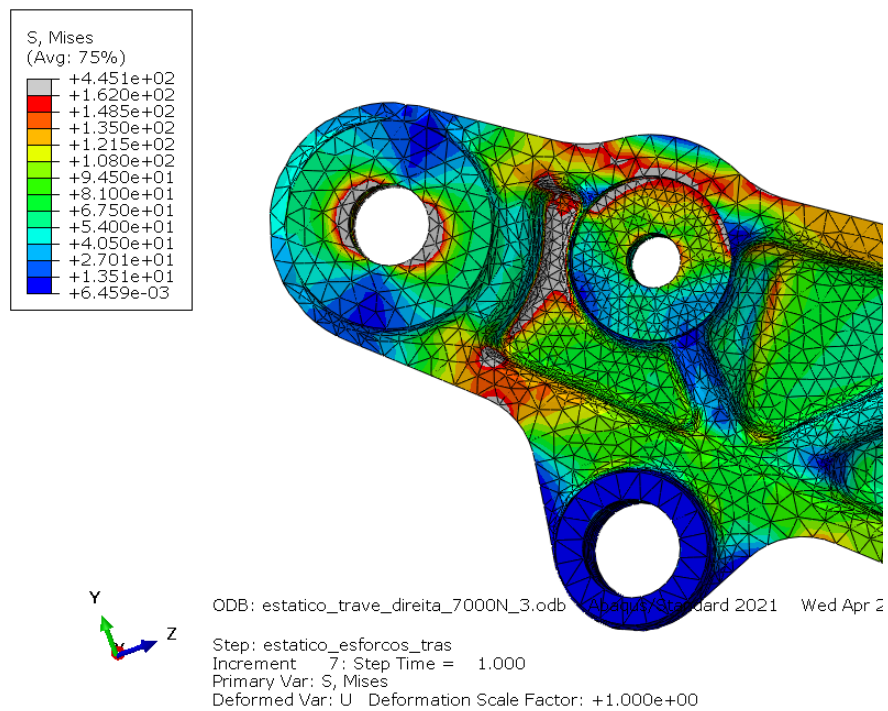


Figura 5.12: Vista interior da zona inferior da trave direita antiga – zona crítica da peça.

5.4 Discussão de resultados

Assim, dos resultados apresentados anteriormente, podemos concluir que na maior parte da geometria as traves do quadro do motociclo foram bem dimensionadas, contudo apresentam algumas regiões mais fracas.

Em ambas as traves, pode-se observar que, na região interior das mesmas, entre o apoio dos pés e a ligação inferior ao berço do quadro, a cor obtida é vermelha, ou seja, o valor de tensão obtido é próximo do valor da tensão de cedência dos materiais e com uma pequena região a apresentar valores de tensão acima da tensão de cedência do material, o que vai de encontro aos resultados anteriormente obtidos experimentalmente no trabalho de tese de doutoramento feito pelo engenheiro Miguel Oliveira [3], onde as traves com uma geometria próxima à estudada nesta tese partiram devido aos elevados esforços sentidos pela mesma em ensaio experimental, em pista todo-o-terreno. Apesar da geometria ter sido atualizada após a fratura nos ensaios experimentais, esta região mais solicitada revela que as alterações feitas podem não ter sido suficientes.

Além desta região, pode-se observar uma outra zona mais solicitada, no eixo de rotação do braço da roda traseira, em que são apresentadas zonas a vermelho, próximas da tensão de cedência e zonas a cinzento, que ultrapassam este valor. Neste caso, os valores obtidos são devidos à forma como foram aplicados os esforços nesta região, que foram aplicados no eixo de rotação do braço da roda traseira, que foram depois distribuídos artificialmente pela superfície interna correspondente, que não produz um resultado tão próximo da realidade.

Para esta geometria de trave, apesar da mesma já se encontrar comercializada e não vir a receber nenhuma atualização, por ser substituída pela trave que irá ser analisada no capítulo seguinte, recomendar-se-ia que fosse feito um reforço da região inferior da mesma (figuras 5.9 e 5.12), entre o apoio dos pés e o eixo de rotação do braço da roda traseira, de forma a diminuir os esforços sentido nessa região. Este reforço poderia ser feito aumentando a espessura de material utilizado na zona ou a largura da peça.

Análise das traves do novo modelo de quadro da PR3

Neste capítulo, tal como no capítulo anterior, serão mostradas as condições de fronteira utilizadas para simulação, bem como a forma de obtenção das malhas utilizadas para a análise das mesmas. De seguida serão mostrados os resultados das simulações no programa *abaqus* [1] feitos às traves novas do quadro da mota PR3. No final do mesmo será feito um comentário aos resultados obtidos.

6.1 Condições de fronteira

Na Figura 6.1, tal como no capítulo 5, podemos ver as condições de fronteira aplicadas à nova geometria de traves da mota PR3. As condições de fronteira aqui utilizadas são as mesmas que foram utilizadas anteriormente, pelo que não será necessário explicar novamente as mesmas. Na Figura 6.2 podemos ver o ponto de aplicação das força correspondente ao peso do condutor.

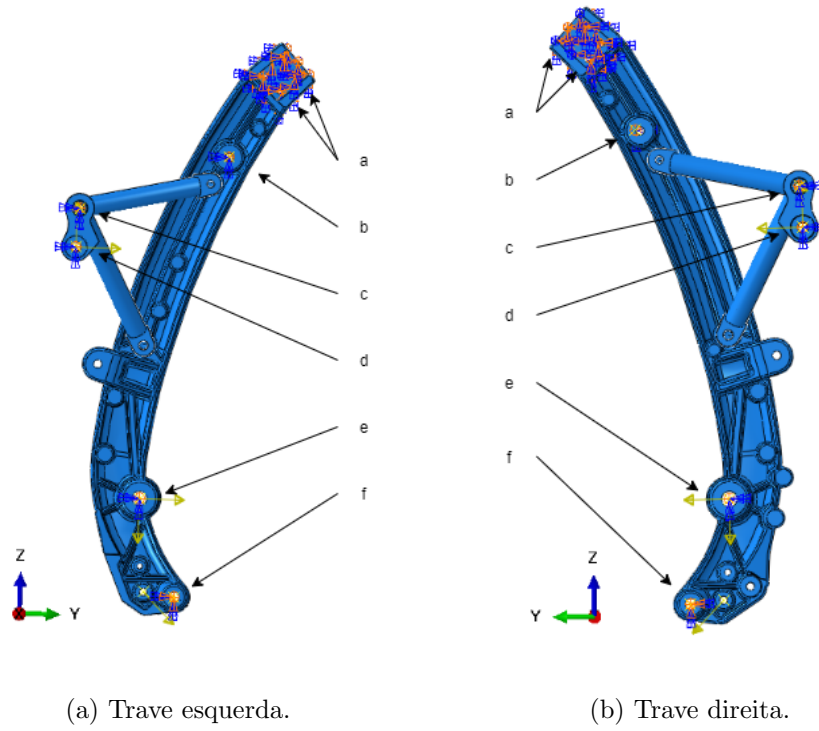


Figura 6.1: Condições de fronteira das traves novas da PR3: *a*—encastramento; *b, c*—apoios laterais; *d, e*—apoios laterais e aplicação de forças; *f*—fixo.

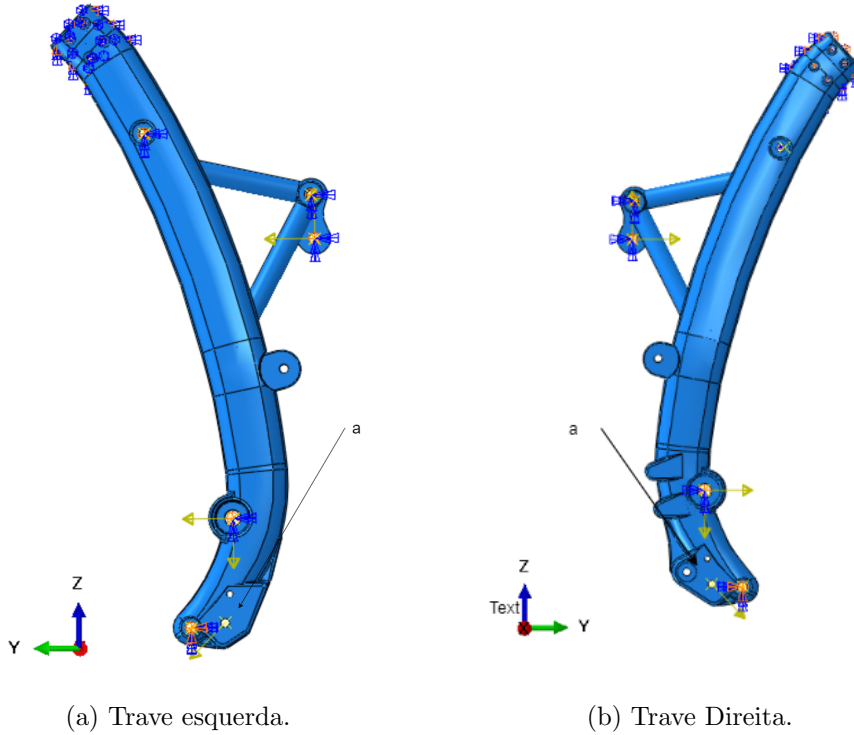


Figura 6.2: Posição de aplicação das forças respectivas ao peso do piloto (ponto *a*).

Da mesma forma que, para efeitos de comparação, se utilizaram as mesmas condições

de fronteira do capítulo 5, as forças aplicadas para simulação são também as mesmas.

6.2 Malha utilizada

Ao contrário das traves do modelo antigo, que eram feitas a partir de uma única peça em alumínio, a nova geometria de traves é composta por várias peças soldadas em aço e por uma trave principal feita em alumínio. Isto fez com que fosse necessário criar duas malhas separadas: uma para as peças em aço soldadas e outra para as peças em alumínio.

Apesar de terem sido feitas as malhas em separado, ambas apresentam as mesmas características, apresentadas na figuras 6.3, 6.4 e 6.5, que são iguais às utilizadas nas simulações do capítulo anterior:

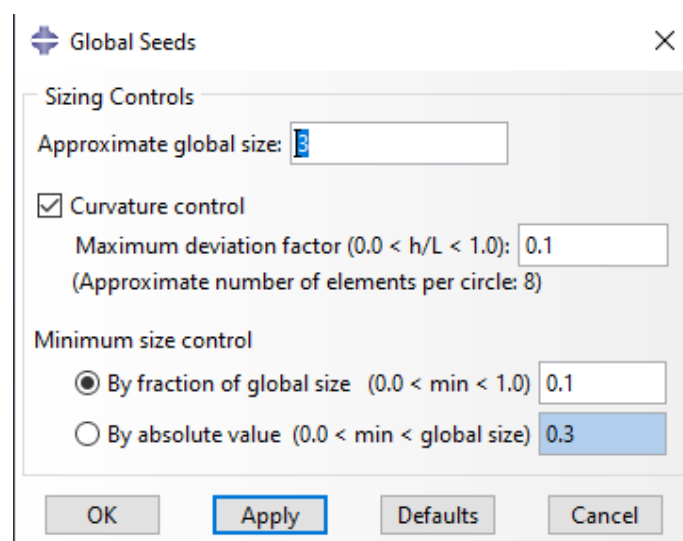


Figura 6.3: Tamanho global dos elementos e aproximação em zonas curvas.

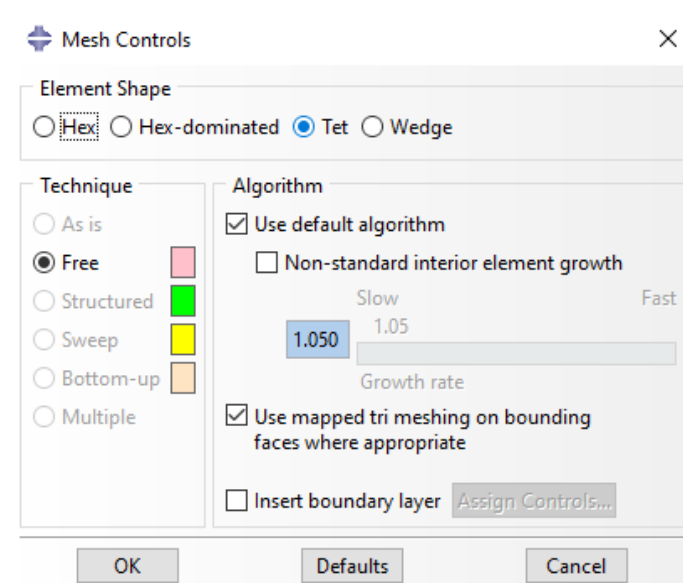


Figura 6.4: Definição da forma dos elementos utilizados.

6. Análise das traves do novo modelo de quadro da PR3

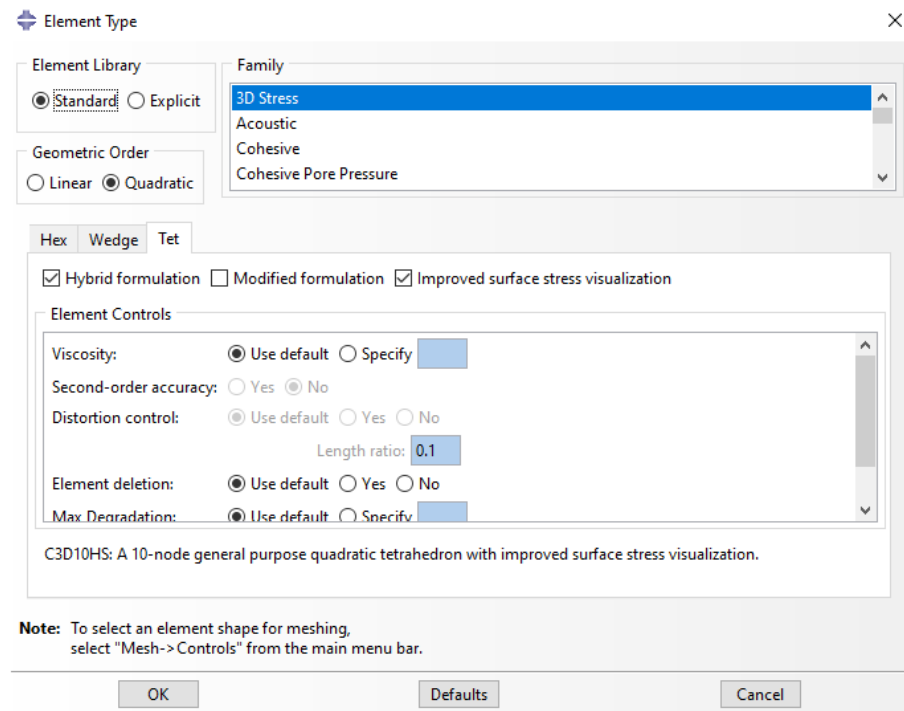
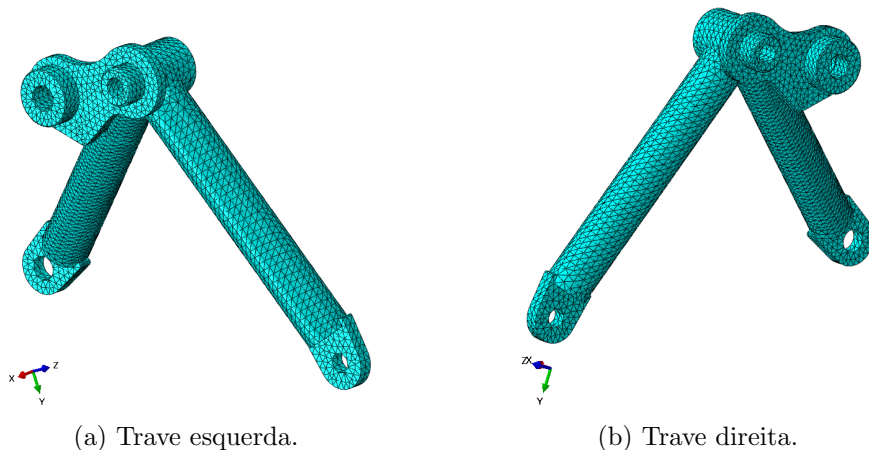


Figura 6.5: Definição do tipo de elemento de malha.

Assim, para análise dos triângulos em aço soldados das traves novas obteve-se uma malha de 43312 nós e 26298 elementos do tipo C3D10HS para o triângulo referente à trave do lado esquerdo e uma malha de 47967 nós e 30661 elementos do tipo C3D10HS para o triângulo referente à trave do lado direito. Na Figura 6.6 são mostradas as malhas obtidas para as peças referidas anteriormente:



(a) Trave esquerda.

(b) Trave direita.

Figura 6.6: Malha gerada nas peças soldadas em aço.

Para as partes fabricadas em alumínio foi obtida uma malha de 335072 nós e 216829 elementos do tipo C3D10HS para a peça do lado esquerdo e uma malha de 347732 nós e 225437 elementos do tipo C3D10HS para a peça do lado direito. Na Figura 6.7 são mostradas as malhas obtidas para as peças das traves feitas em alumínio:

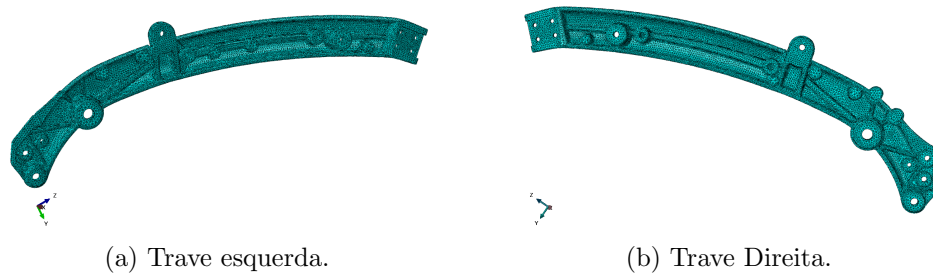


Figura 6.7: Malha gerada nas traves de alumínio.

Para fazer as simulações das traves completas é necessário unir artificialmente as duas malhas criadas separadamente, para isso, no programa *abaqus* foi criada uma união artificial usando a ferramenta *tie* do mesmo programa. Esta ferramenta permite unir os nós das malhas de duas superfícies diferentes, ficando ambas com os mesmos valores de deslocamento. Assim, no caso das traves em estudo foram unidas as superfícies nas regiões próximas à ligação aparafusada existente entre elas.

Na Figura 6.8 podemos ver indicadas as superfícies da trave do lado direito às quais foi aplicada a ferramenta *tie* com o objetivo de unir as respectivas malhas para análise. Para a análise da trave do lado esquerdo procedeu-se da mesma forma.

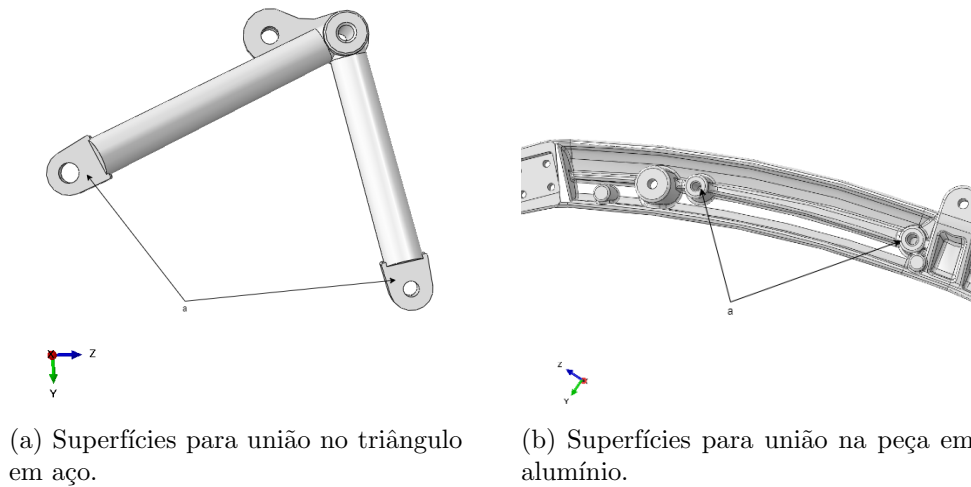


Figura 6.8: Superfícies unidas artificialmente através da ferramenta *tie* da trave nova do lado direito.

Assim, após este processo de preparação, as peças submetidas para análise tinham o aspecto já apresentado na Figura 6.1.

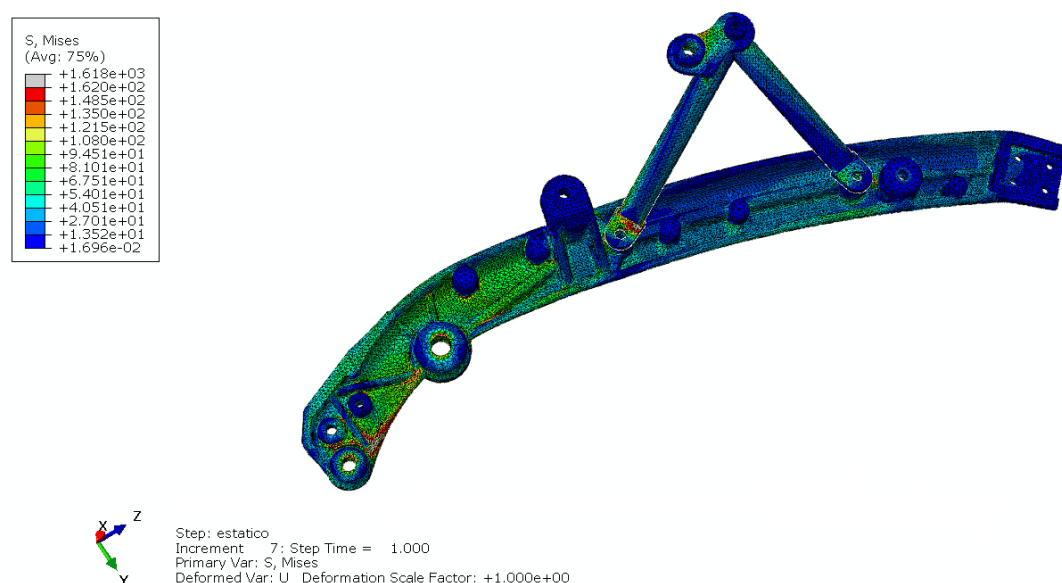
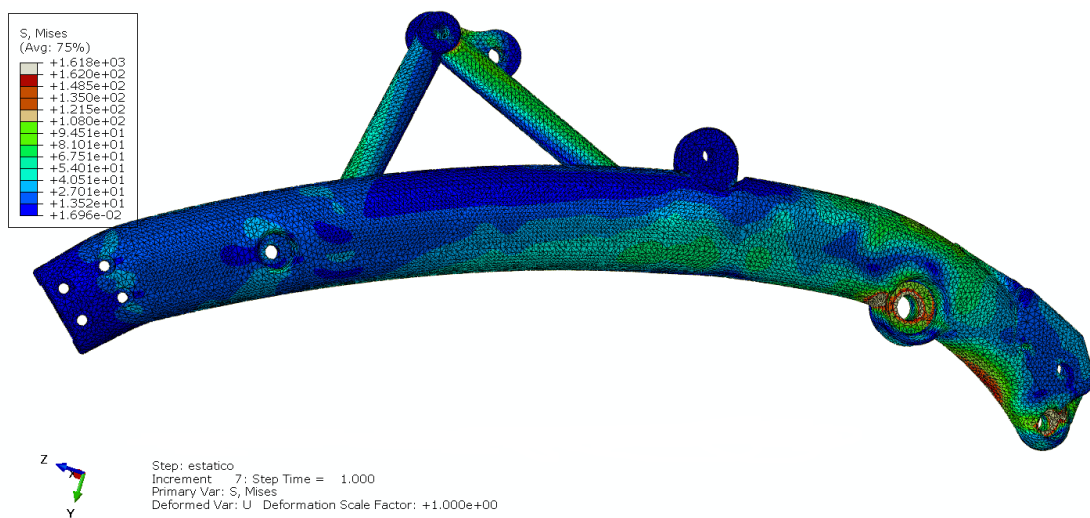
6.3 Resultados

Nesta secção serão apresentados os resultados obtidos na simulação da nova geometria da trave do lado esquerdo. Em primeiro lugar são apresentadas imagens globais das traves em que se pode ver os resultados obtidos por toda a geometria (figuras 6.9, 6.10) e de seguida são apresentadas imagens mais aproximadas das zonas mais críticas. No fim, são apresentados os resultados do triângulo em aço soldado que une à peça de alumínio. De

notar que em todas as imagens o limite superior indicado é de 162 MPa, correspondente à tensão limite elástica da liga de alumínio utilizada e que apenas nas imagens referentes ao triângulo em aço o limite superior utilizado é de 230 MPa, correspondente à tensão limite elástica do aço utilizado.

6.3.1 Resultados trave esquerda

Nas figuras 6.9 até 6.13 são apresentados os resultados da trave em alumínio do lado esquerdo, com o limite superior de tensão correspondente ao alumínio. Nas figuras 6.14 e 6.15 são apresentados os resultados da estrutura tubular de suporte, com o limite superior de tensão correspondente ao aço.



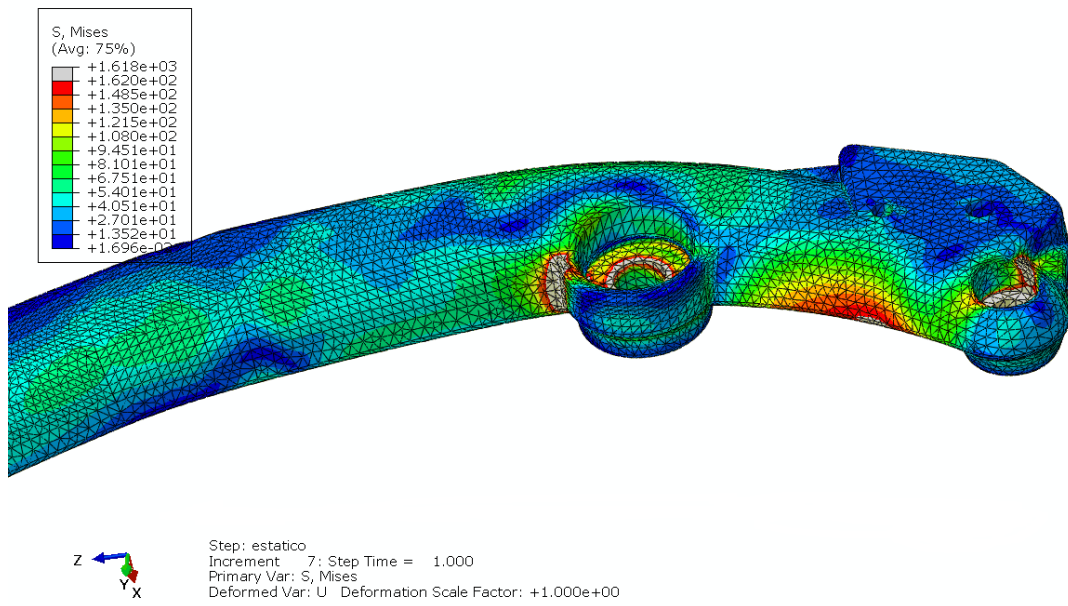


Figura 6.11: Vista exterior da parte inferior da nova trave esquerda.

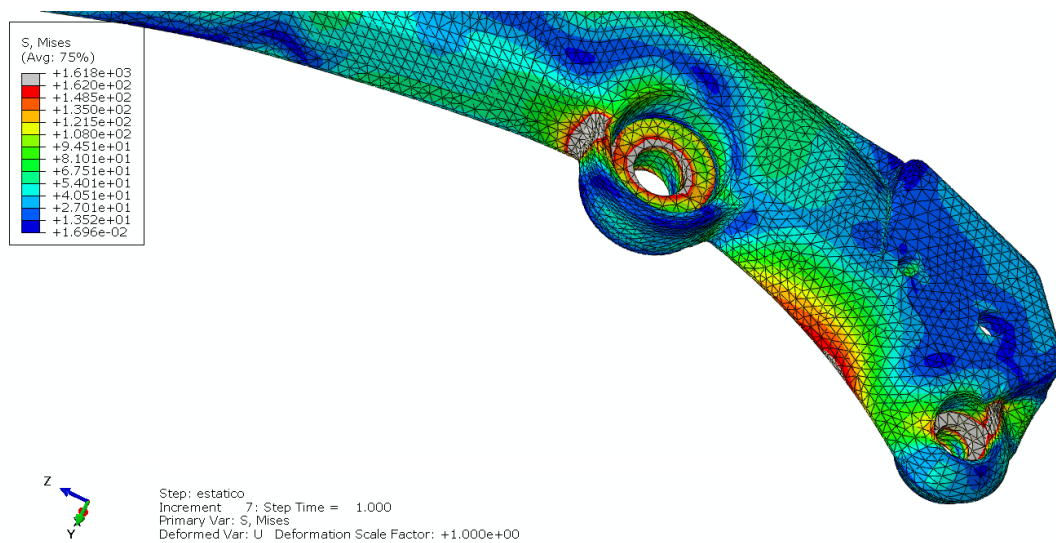


Figura 6.12: Vista exterior da parte inferior da nova trave esquerda - outro ângulo.

6. Análise das traves do novo modelo de quadro da PR3

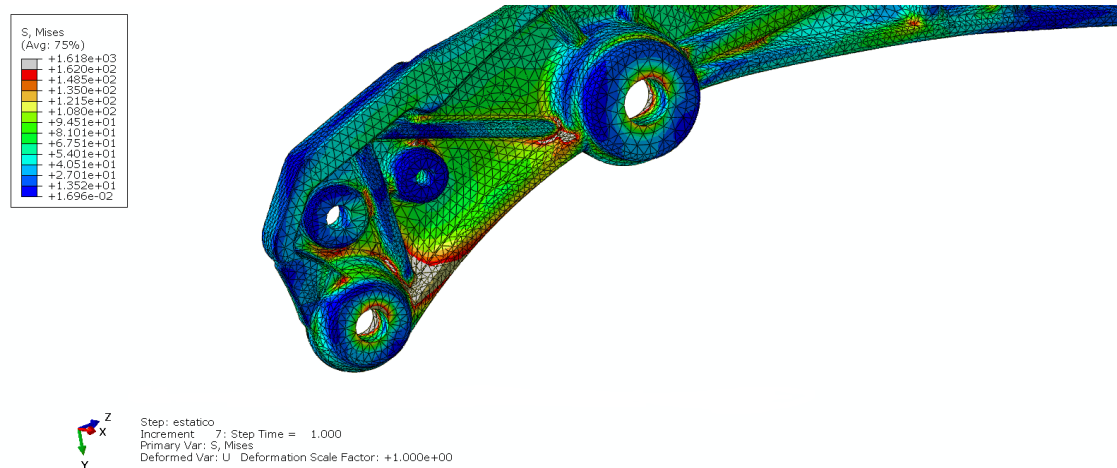


Figura 6.13: Vista interior da parte inferior da nova trave esquerda.

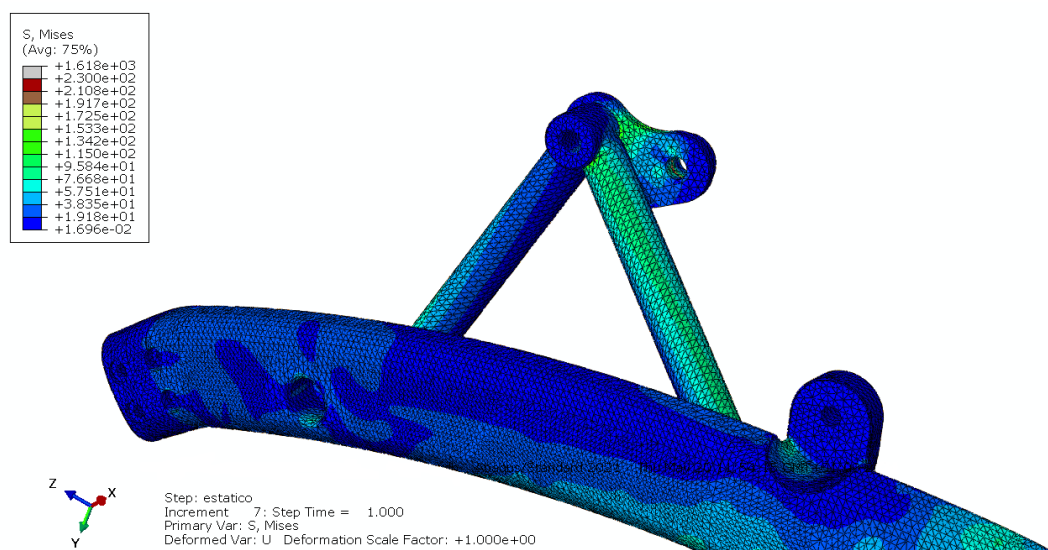


Figura 6.14: Vista exterior do triângulo de fixação do suporte do amortecedor da nova trave esquerda.

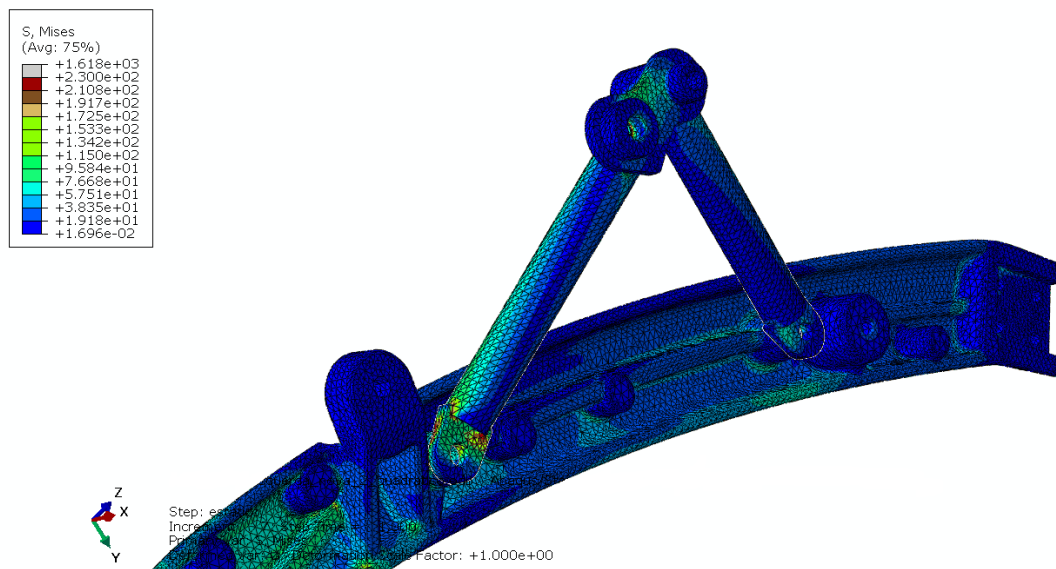


Figura 6.15: Vista interior do triângulo de fixação do suporte do amortecedor da nova trave esquerda.

6.3.2 Resultados trave direita

Nas figuras 6.16 até 6.21 são apresentados os resultados da trave em alumínio do lado direito, com o limite superior de tensão correspondente ao alumínio. Nas figuras 6.22 e 6.23 são apresentados os resultados da estrutura tubular de suporte, com o limite superior de tensão correspondente ao aço.

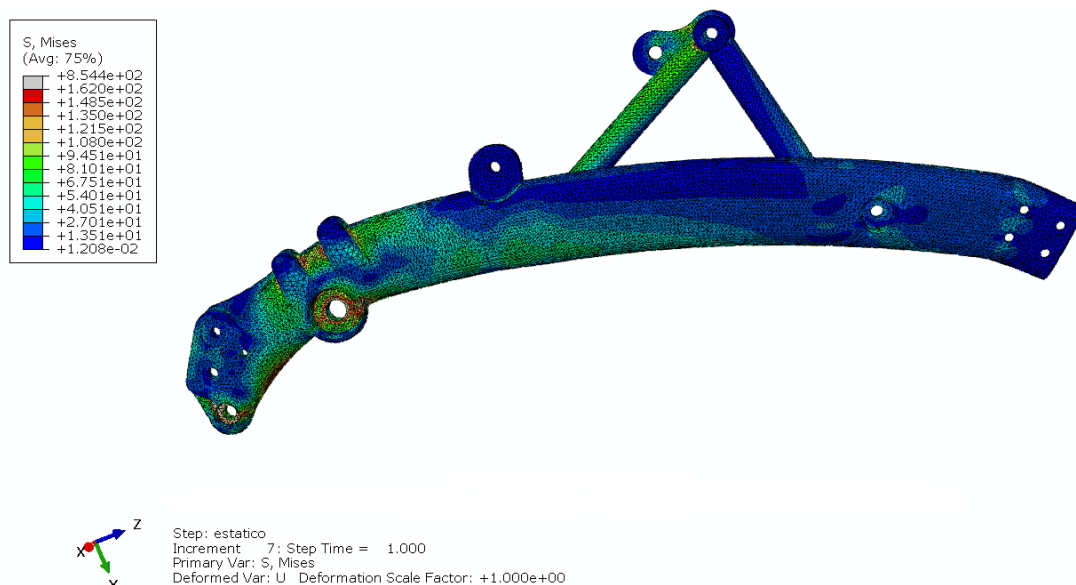


Figura 6.16: Vista exterior da nova trave direita.

6. Análise das traves do novo modelo de quadro da PR3

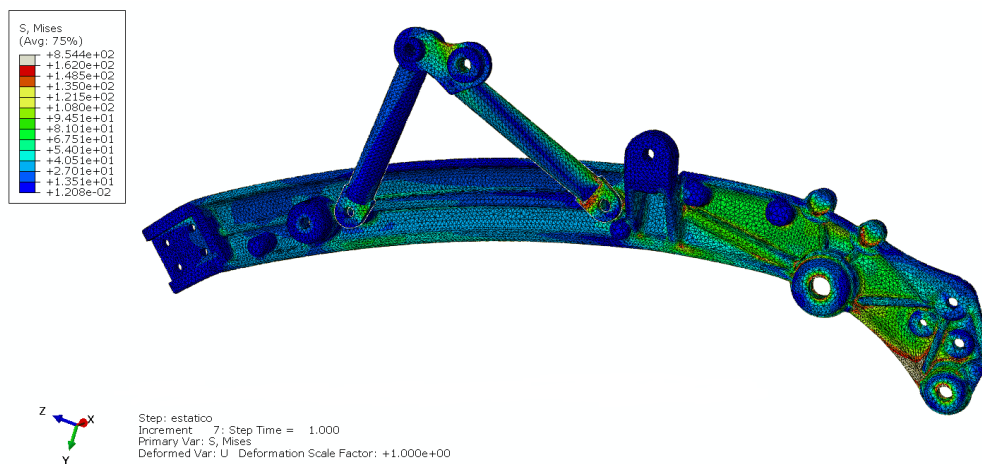


Figura 6.17: Vista interior da nova trave direita.

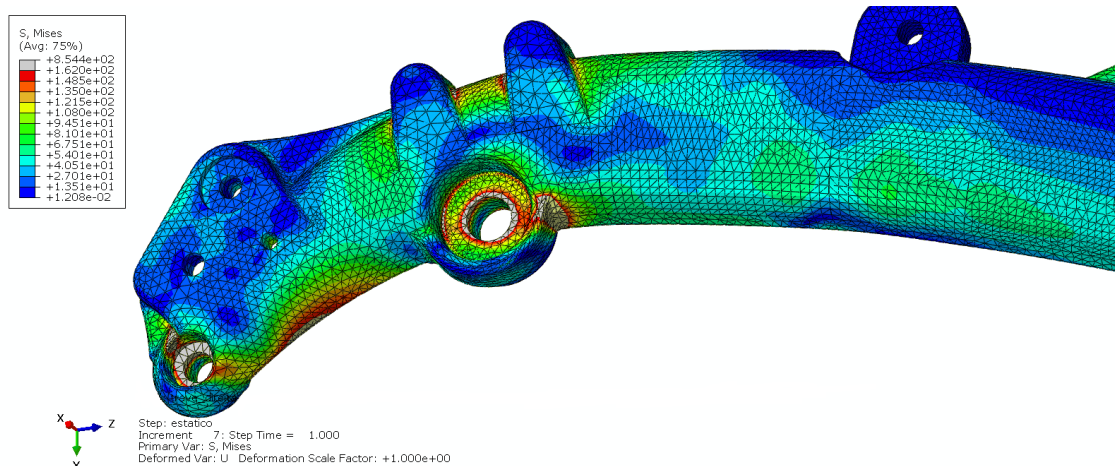


Figura 6.18: Vista exterior da zona inferior da nova trave direita.

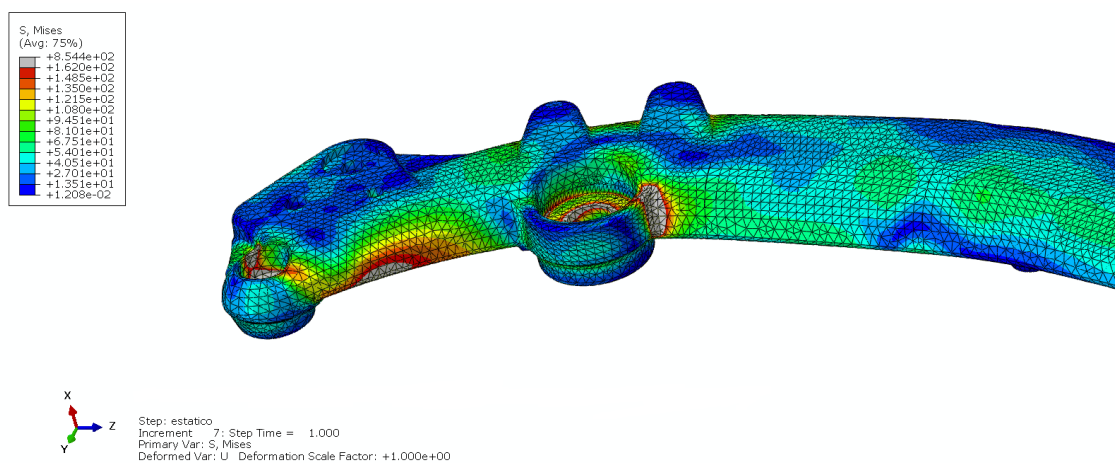


Figura 6.19: Vista exterior da zona inferior da nova trave direita - zona mais crítica.

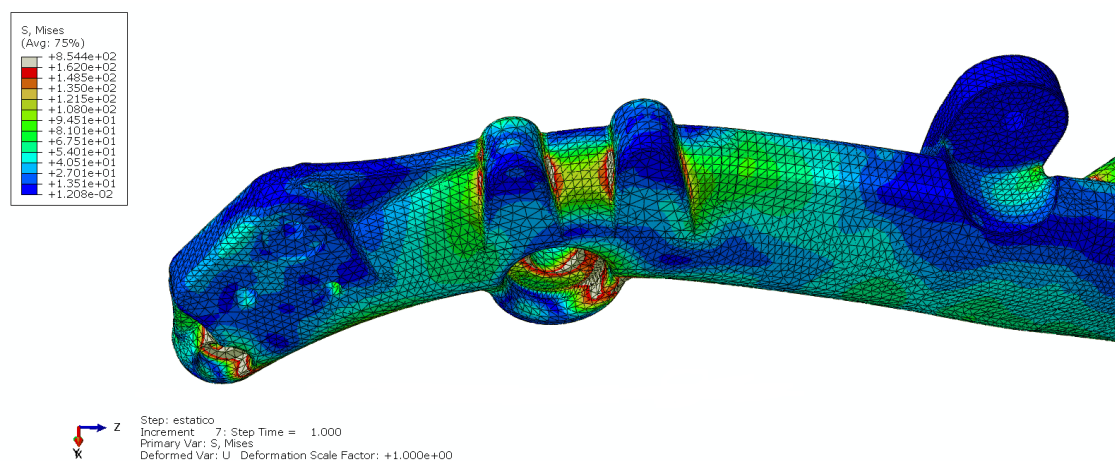


Figura 6.20: Vista exterior da zona inferior da nova trave direita - raios de concordância de suportes para aperto de parafusos.

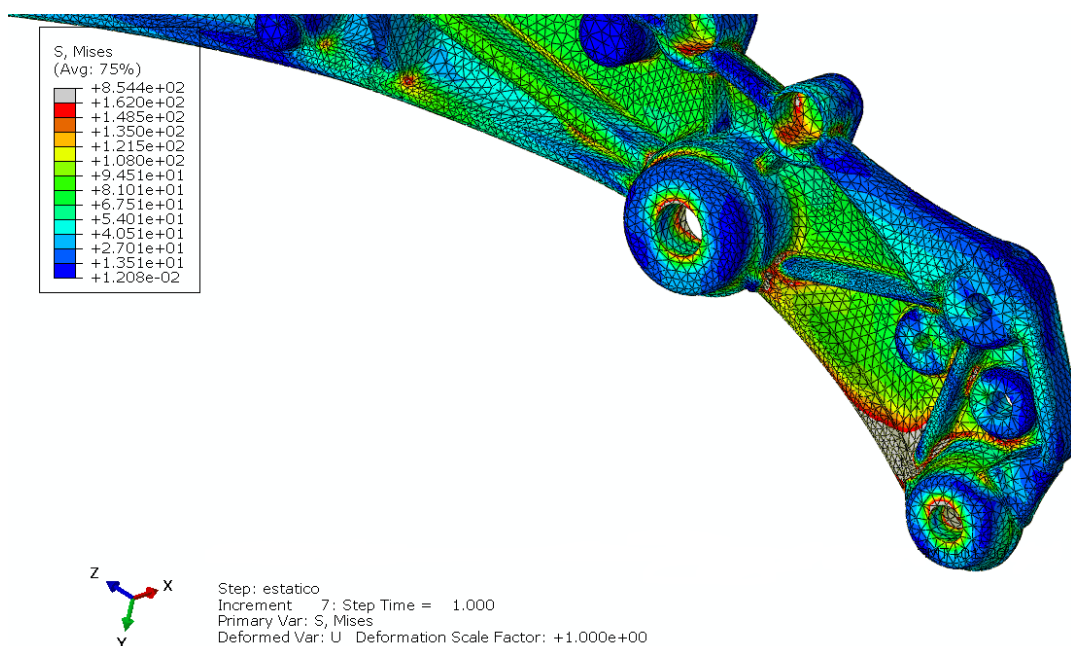


Figura 6.21: Vista interior da zona inferior da nova trave direita.

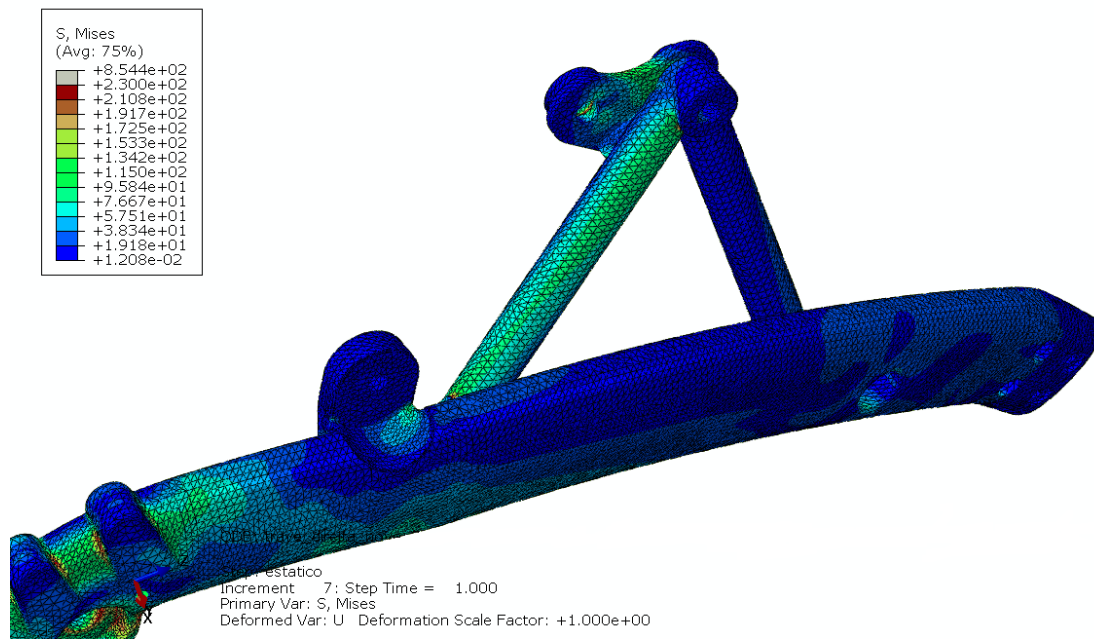


Figura 6.22: Vista exterior do triângulo de fixação do amortecedor da nova trave direita.

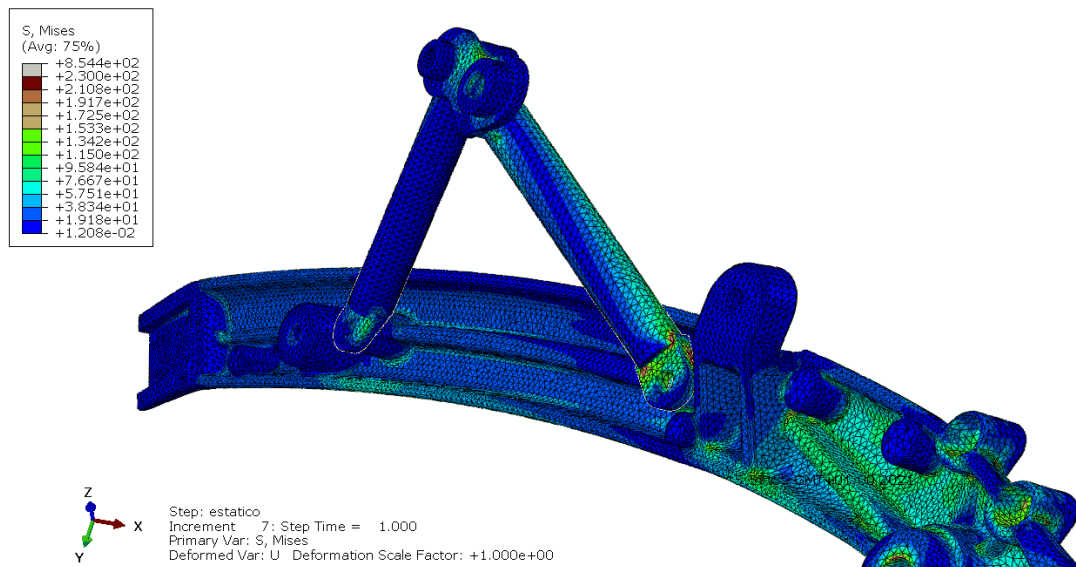


Figura 6.23: Vista interior do triângulo de fixação do amortecedor da nova trave direita.

6.4 Discussão de resultados

Após analisadas as imagens com os resultados da nova geometria de trave, podemos afirmar que para qualquer um dos casos (trave esquerda e trave direita) os triângulos em aço das mesmas suportam os esforços aos quais estão a ser submetidos (figuras 6.14, 6.15, 6.22, 6.23), pelo que não será necessária nenhuma alteração a esta geometria segundo as condições de teste utilizadas para esta análise.

Nas partes em alumínio das traves, nas figuras correspondentes às traves do lado esquerdo 6.11 e 6.12 e nas figuras correspondentes às traves do lado direito 6.18 e 6.19

podemos ver junto ao apoio do eixo do braço da roda traseira uma região acinzentada, que ultrapassa a tensão de cedência do material devido ao raio de concordância nesta zona ser pequeno. Este problema pode ser corrigido ajustando este raio através da adição de mais material nesta região. Podemos verificar que também no eixo de rotação do braço da roda traseira e na ligação da trave ao berço do quadro se encontram regiões de cor cinzenta. Estas zonas surgem devido à forma como as condições de fronteira são aplicadas e os esforços se distribuem para o resto da peça. Neste caso, tal como referido anteriormente na análise das traves antigas, esta zona não se encontra tão próxima da situação real.

Na Figura 6.13 da trave esquerda e na Figura 6.21 da trave direita pode-se observar na parte inferior, junto à zona de ligação com o berço do quadro, uma região cinzenta na estrutura, na qual a peça também ultrapassa a tensão limite elástico, o que pode levar a problemas no futuro, nomeadamente à quebra da trave nesta zona como nos testes experimentais realizados em trabalhos anteriores [3]. Assim, para corrigir este problema sugere-se o aumento da espessura da trave e o aumento da espessura das nervuras da mesma nesta região, de forma a reduzir as tensões sentidas nesta zona da peça.

Na Figura 6.20 referente à trave direita, pode-se observar na parte superior duas orelhas de suporte a equipamentos do motociclo (bomba de travões do travão traseiro). Nestes pode-se observar que o raio de concordância com a superfície da trave é demasiado baixo, o que leva a uma concentração de tensões nesta zona. Este problema pode ser resolvido com adição de mais material, aumentando, assim, o raio de concordância do mesmo. Na Figura 6.21, também se pode ver as orelhas referidas anteriormente de uma perspectiva diferente. Aqui é possível observar que, no interior das mesmas, também se encontra um valor de tensões elevado. Para resolver esta questão sugere-se aumentar a espessura das orelhas.

Alterações propostas à nova geometria

Neste capítulo será mostrada a evolução de um processo iterativo com o objetivo de corrigir a zona mais crítica da geometria nova das traves, que se pode encontrar na Figura 7.1. Estas alterações focam-se mais na zona inferior da trave, junto à ligação dos poisa-pés e à ligação inferior com o berço do quadro, uma vez que esta foi a zona das traves com mais elementos a ultrapassar a zona de cedência do material. Esta zona coincide com a zona da geometria antiga na qual ocorreu fractura em testes experimentais, no decorrer da dissertação do Engenheiro Miguel Oliveira [3].

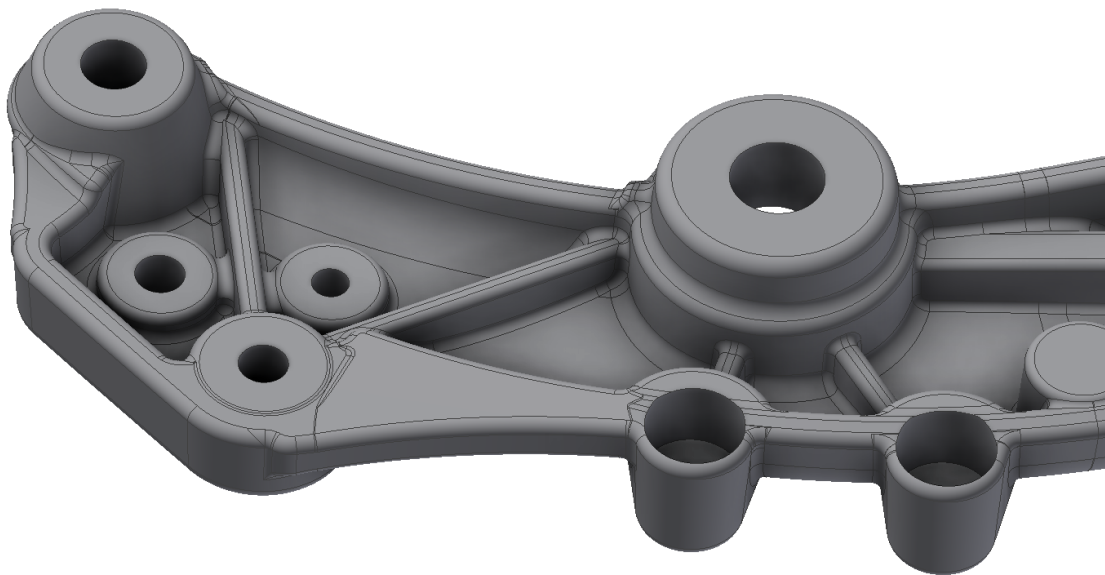


Figura 7.1: Zona mais crítica da geometria original da trave direita

Todas a simulação mostradas ao longo deste capítulo foram efetuadas nas mesmas condições das simulações mostradas no capítulo 6.

De notar que mais alterações não foram efetuadas devido à dificuldade em editar a geometria *STEP* fornecida pela empresa, pelo que as alterações mostradas envolvem acréscimo de material e não a edição de superfícies já existentes.

7.1 Primeira iteração

Na primeira iteração (Figura 7.2) acrescentou-se algum material junto à zona mais solicitada, de forma a que a superfície superior se mantivesse paralela com a nervura interior existente nesta zona.

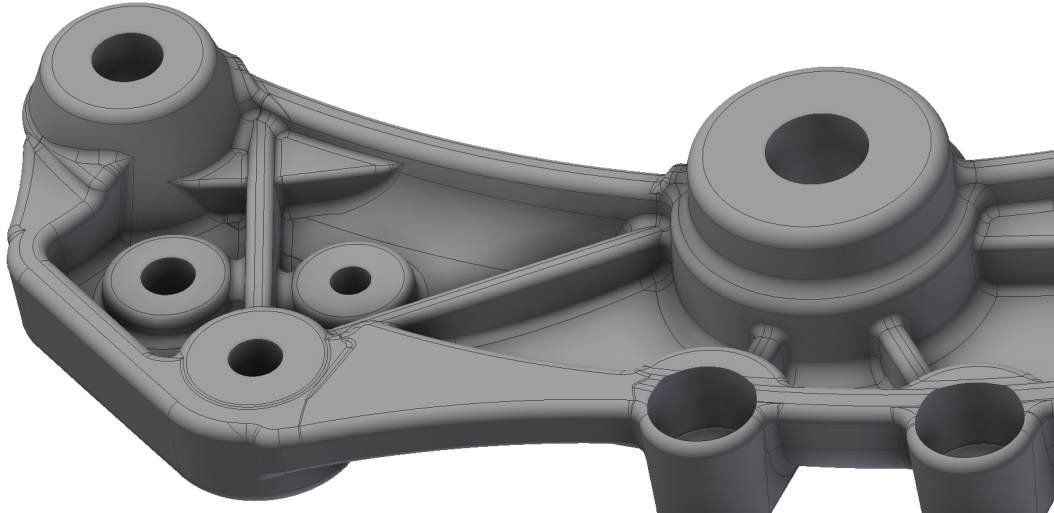


Figura 7.2: Primeira iteração de modificação da trave direita.

Como se pode observar na Figura 7.3, a alteração efetuada à geometria levou à diminuição da área da trave que ultrapassa a tensão de cedência, apesar de ser apenas uma diminuição ligeira.

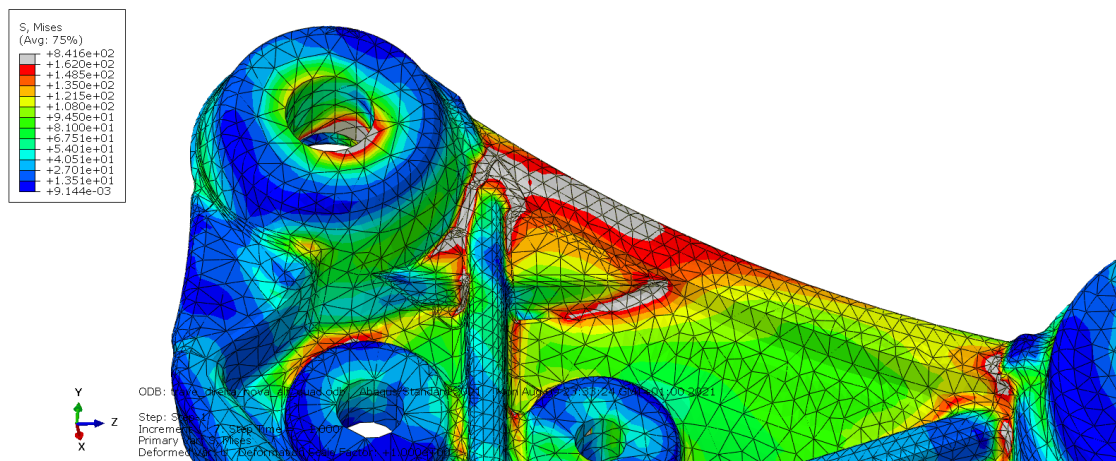


Figura 7.3: Resultados da primeira iteração de modificação da trave direita.

7.2 Segunda iteração

Na segunda iteração (Figura 7.4) acrescentou-se um pouco de material na parte de cima do já adicionado anteriormente, de forma que a superfície superior de material ganhe alguma inclinação para a zona onde a nervura interior termina.

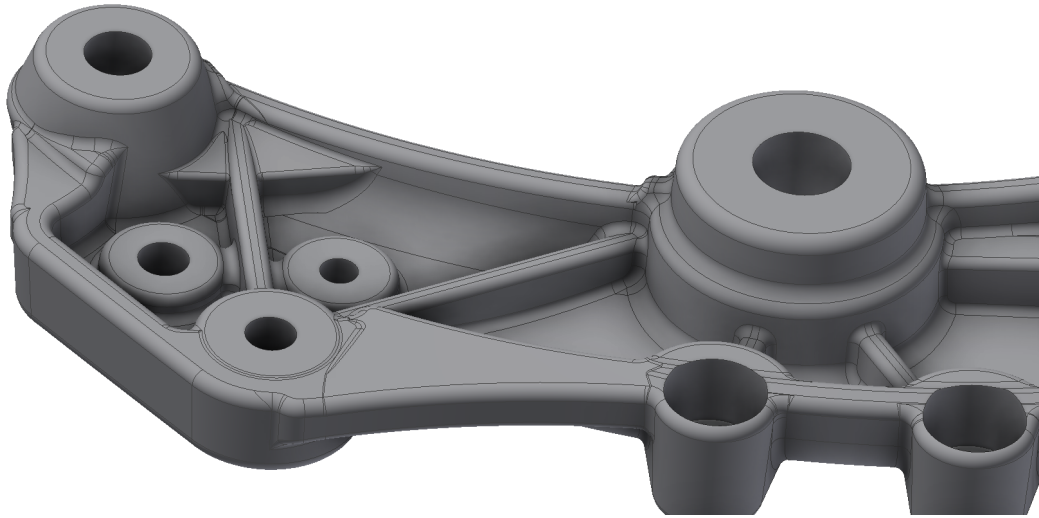


Figura 7.4: Segunda iteração de modificação da trave direita.

Como se pode observar na Figura 7.5, esta alteração também melhorou a resposta da trave à solicitação em análise, contudo será necessário continuar a melhorar a mesma.

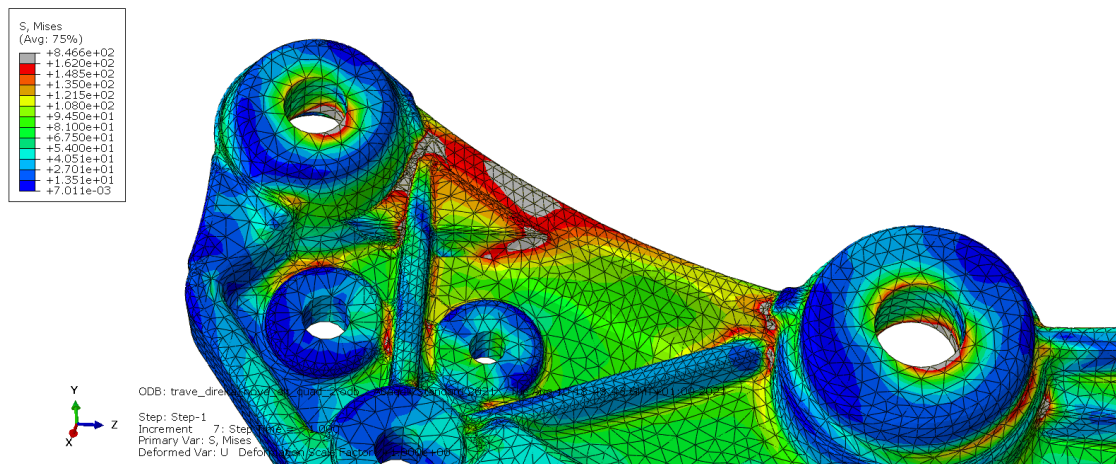


Figura 7.5: Resultados da segunda iteração de modificação da trave direita.

7.3 Terceira iteração

Na terceira iteração (Figura 7.6) acrescentou-se algum material num patamar acima do acrescentado anteriormente, que termina a uma altura próxima da nervura exterior.

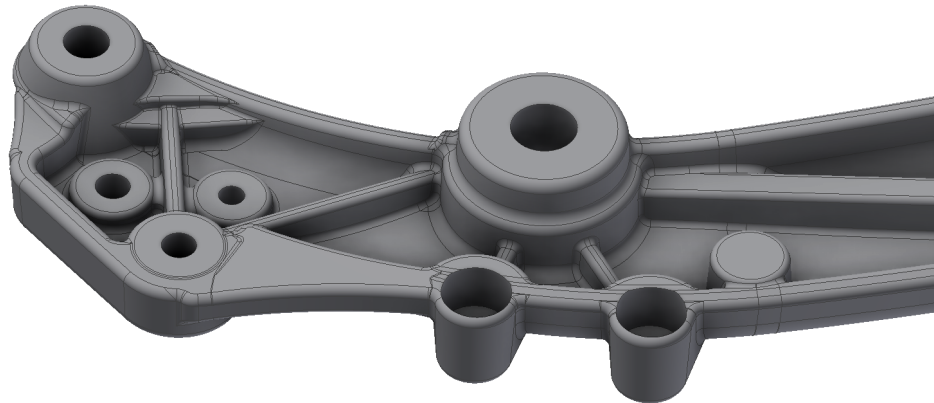


Figura 7.6: Terceira iteração de modificação da trave direita.

Observando-se a Figura 7.7, pode-se concluir que neste último acréscimo houve uma melhoria junto à ligação ao apoio inferior da trave, movendo a zona que ultrapassa a tensão de cedência do material mais para a direita. Assim, nas iterações seguintes, esta alteração será abandonada e será feita uma correção mais uniforme.

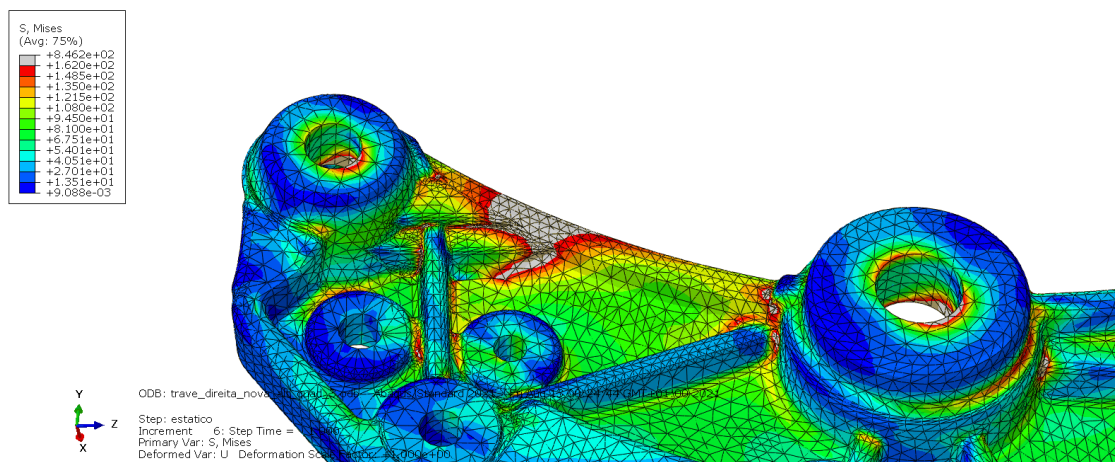


Figura 7.7: Resultados da terceira iteração de modificação da trave direita.

7.4 Quarta iteração

Na quarta iteração (Figura 7.9) tentou-se efetuar uma transição mais suave entre a nervura exterior e o material adicionado anteriormente. Para isso iniciou-se a parede de material a cerca de metade da distância entre o apoio inferior da trave e o eixo de rotação do braço da roda traseira. A superfície superior a esta parede de material, gerada a partir da mesma, é inclinada e aproxima-se da altura da nervura exterior à medida que se aproxima da canto da peça nesta zona.

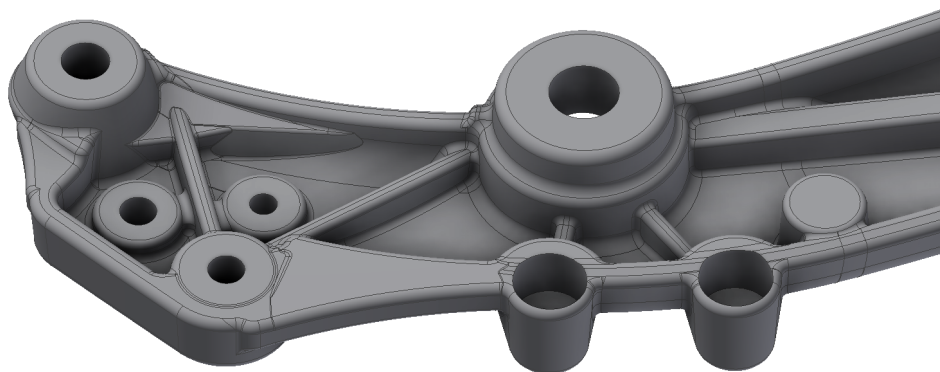


Figura 7.8: Quarta iteração de modificação da trave direita.

A partir do resultado desta simulação, que se pode observar na Figura 7.9, conclui-se que com esta alteração foi possível reduzir a quantidade de material que ultrapassa a tensão de cedência na nervura exterior da peça e na zona de transição entre esta e a parede de material adicionado, ficando apenas uma zona crítica bastante mais reduzida na zona envolvente do apoio inferior da trave.

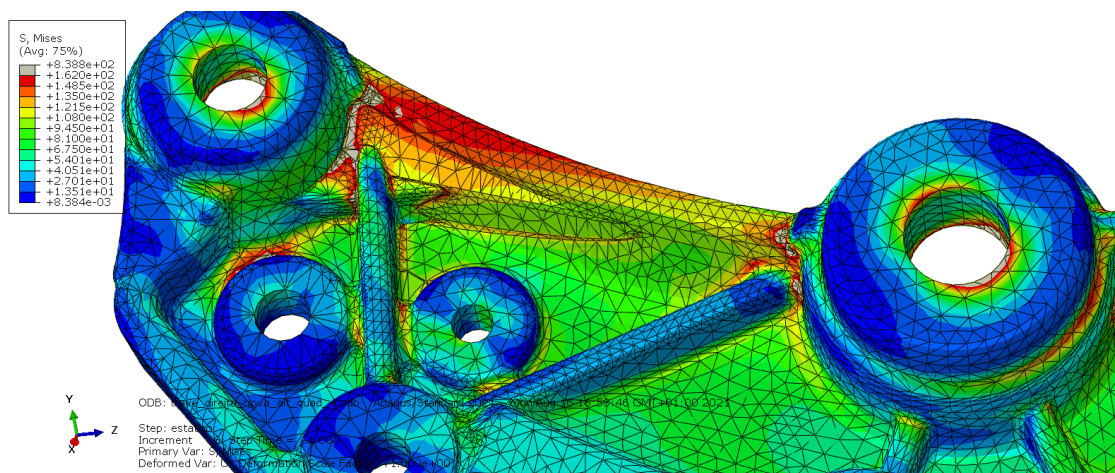


Figura 7.9: Resultados da quarta iteração de modificação da trave direita.

7.5 Quinta iteração

Na quinta iteração (Figura 7.10) tentou-se solucionar o problema referido anteriormente, acrescentando-se um pouco de material do lado esquerda da nervura interior mostrada na figura.

Nesta simulação também se tentou reduzir a quantidade de material que ultrapassa a tensão de cedência do material em duas zonas envolventes do apoio do eixo de rotação do braço da roda traseira. Em ambos os lados deste eixo acrescentou-se um pouco de material junto à nervura exterior da peça para tentar minimizar as tensões do material nesta zona.

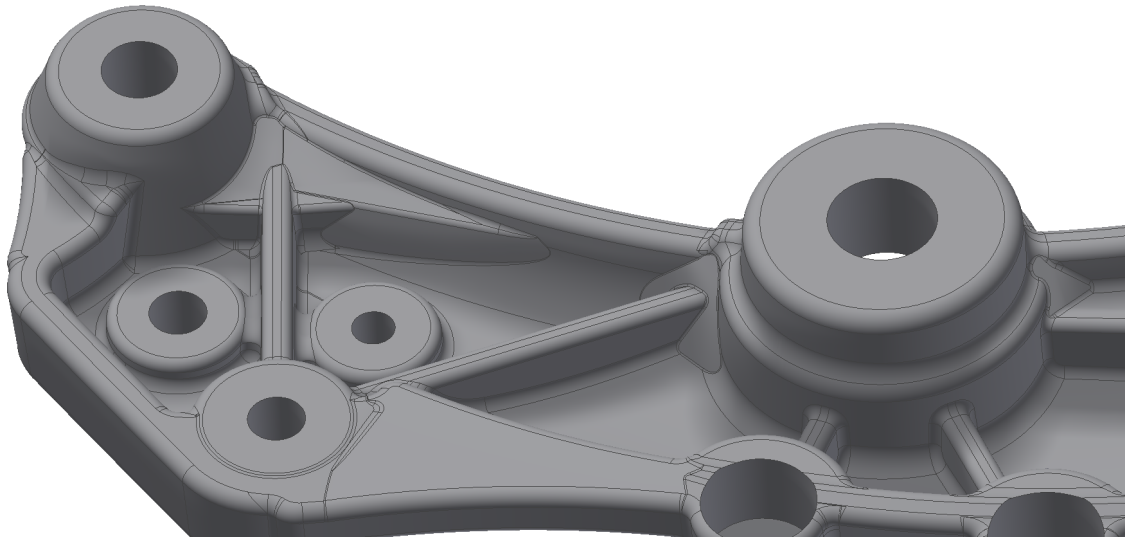


Figura 7.10: Quinta iteração de modificação da trave direita.

Na Figura 7.11 pode-se observar que na zona mais crítica, alvo principal das alterações efetuadas até agora, praticamente todas as zonas nas quais era ultrapassada a tensão de cedência do material, se encontram abaixo desse valor.

Na zona à esquerda do eixo do braço da roda traseira, onde se colocou material, podemos observar que a tensão de cedência é apenas atingida no contorno da superfície adicionada, o que acontece devido à transição não ser suave.

Na zona à direita do eixo do braço da roda traseira, observa-se que o material adicionado pouco efeito teve na redução de zonas em que a tensão de cedência é ultrapassada.

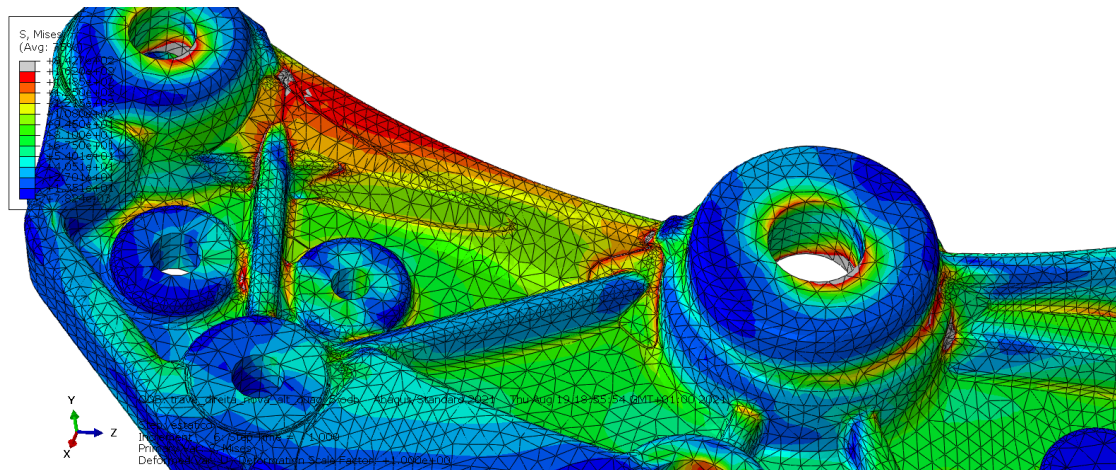


Figura 7.11: Resultados da quinta iteração de modificação da trave direita.

7.6 Sexta iteração

Na sexta iteração (Figura 7.12), aumentou-se um pouco a inclinação das superfícies de ambos os lados da nervura que atravessa a peça, com o objetivo de minimizar a transição para a nervura exterior. Alterou-se também a superfície do lado esquerdo de forma a que esta coincidissem com a aresta formada pela parede adicionada do lado esquerdo.

Do lado esquerdo do eixo do braço traseiro aumentou-se a quantidade de material adicionado de forma a que a transição entre superfícies se tornasse mais suave.

Do lado direito do eixo do braço traseiro aumentou-se gradualmente a altura da mesma à medida que se vai aproximando da parede de forma a suavizar esta transição.

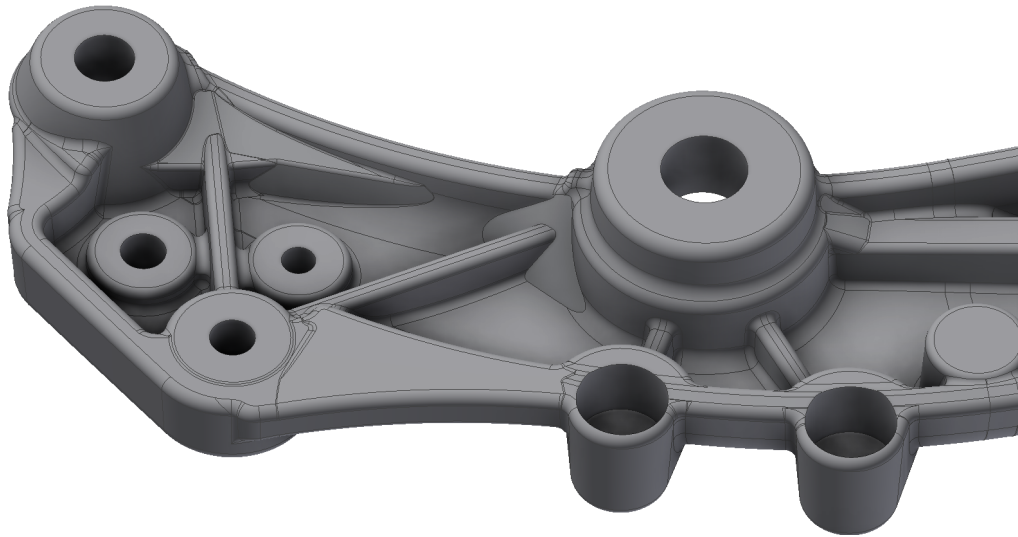


Figura 7.12: Sexta iteração de modificação da trave direita.

Pela observação da Figura 7.13, foi possível eliminar qualquer zona onde a tensão de cedência era ultrapassada na zona inferior da peça e do lado esquerdo do eixo do braço traseiro. Neste último caso, seria possível obter melhores resultados caso se conseguisse suavizar a transição entre a superfície original e a superfície acrescentada, o que não foi alcançado devido a erros geométricos. Do lado direito do eixo do braço traseiro já não foi possível reduzir o tamanho das zonas que ultrapassam a tensão de cedência, uma vez que ambas alterações feitas nesta zona pouco efeito tiveram nos resultados obtidos.

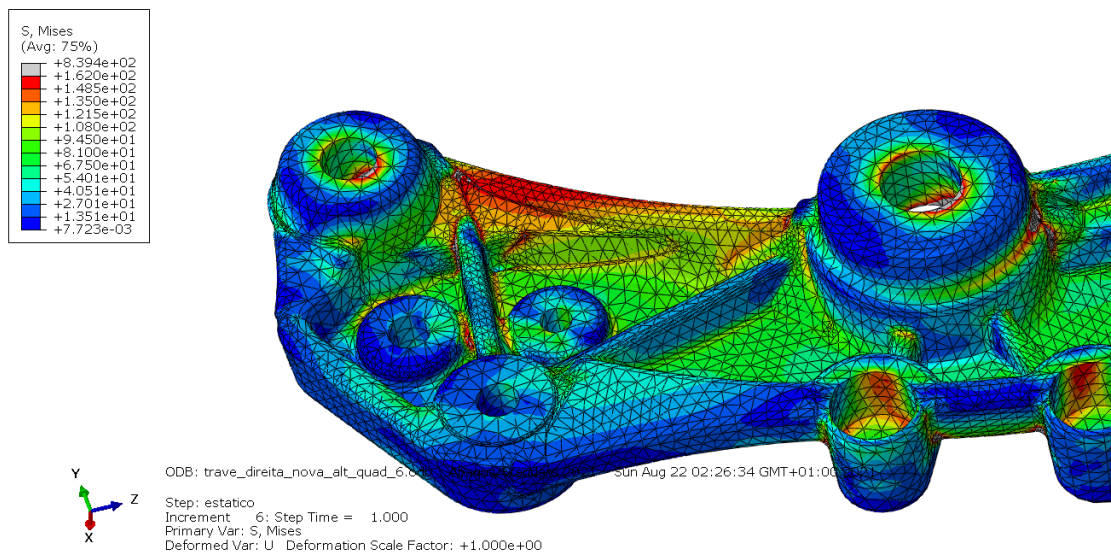


Figura 7.13: Resultados da sexta iteração de modificação da trave direita.

Conclusão

8.1 Conclusões

Nesta dissertação pretendia-se estudar e otimizar a geometria de trave do quadro que a empresa AJP se encontra a desenvolver para atualização futura dos modelos de motociclo PR3 e PR4, que irão partilhar o mesmo quadro.

Tendo em vista um quadro robusto e que seja capaz de aguentar várias situações extremas de utilização, foi proposto como situação crítica uma aterragem de um salto, em que o motociclo entraria em contacto com o solo apenas através da roda traseira do mesmo, com uma força de impacto equivalente a quatro vezes o peso do conjunto motociclo mais condutor, devido ao coeficiente dinâmico de 4 aplicado. Esta força considerada revelou-se mais do que suficiente para comprimir totalmente o amortecedor traseiro do motociclo, pelo que os esforços sentidos na roda traseira na simulação são todos transferidos diretamente para o quadro.

Após a análise efetuada ao modelo de traves antigo, podemos verificar que a zona corrigida após rutura na tese de doutoramento do engenheiro Miguel Oliveira [3] continua fragilizada. Como esta peça foi comercializada durante vários anos sem que ocorresse fratura da mesma, podemos concluir que a situação crítica considerada para o quadro deste motociclo para as simulações feitas no decorrer desta dissertação possa ter excedido os esforços a que este motociclo está sujeito durante a sua utilização, criando, assim, zonas que em simulação aparecem como críticas, mas, que na realidade, não o são. Em alternativa, se considerarmos que esta simulação apresenta uma situação crítica extrema que é alcançada na realidade, apresentando, assim, as simulações resultados que correspondem à utilização do motociclo, podemos concluir que esta geometria de traves foi comercializada contendo uma zona frágil que poderia levar à sua fratura. Esta fratura não foi verificada enquanto este quadro se encontrava a ser comercializado, muito provavelmente porque a zona apenas deformou plasticamente, sem que houvesse fratura, apesar de esta situação não dever ocorrer na realidade por apresentar um risco para o utilizador.

Na análise efetuada à nova geometria de traves do quadro deste motociclo, na mesma situação das traves anteriormente referidas, verificou-se que também existiam problemas com a geometria. Nesta análise, a área das zonas que ultrapassam a tensão de cedência do material é maior do que no modelo anterior, o que revela que esta geometria necessita de ajustes para que possa ser colocada no mercado. A zona que necessita de maiores ajustes é a zona equivalente da geometria antiga, onde a trave partiu em testes experimentais e que ainda revela alguma fragilidade. Noutras zonas da peça há, também, alguns elementos que ainda ultrapassam a tensão de cedência do material, principalmente devido aos raios de concordância usados.

Após as várias iterações efetuadas para tentar corrigir os principais problemas estruturais das traves em desenvolvimento, verifica-se que, na zona mais crítica, o problema ficou praticamente corrigido. Nas outras duas zonas, o problema foi minimizado, mas, ainda serão necessárias mais alterações para se colocar toda a geometria abaixo da tensão de cedência do material. Além destas zonas que foram alteradas existem, também, outras zonas mais pequenas cujos elementos ultrapassam a tensão de cedência, principalmente devido a raios de concordância escolhidos para suavizar os contornos da peça nestas zonas. Devido ao facto de o ficheiro com a geometria das peças em análise ter sido enviado no formato *STEP* e este não possuir o histórico de como a peça foi feita, não sendo possível apagar ou editar comandos efetuados para a construção da peça, não foi possível editar os raios de concordância nas zonas onde seria necessário para corrigir este problema.

8.2 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros sugere-se a continuação da análise de alterações para otimização da geometria em estudo, tentando corrigir os problemas referidos anteriormente.

Sugere-se, também, um estudo da trave recorrendo à tecnologia de otimização topológica para que se tente eliminar excesso de material em zonas sobredimensionadas do quadro. Este estudo deverá ser efetuado utilizando várias situações de carga, para que a geometria seja otimizada tendo em vista várias situações de uso e não seja otimizada apenas para uma situação de carga.

Com o objetivo de melhorar a análise estática efetuada nesta dissertação, sugere-se efetuar o mesmo tipo de análise sem isolar a peça em estudo, fazendo uma análise completa a todo o quadro de uma só vez e, se possível, estudar o quadro em mais tipos de situações extremas para que o estudo possa ser mais completo.

Referências

- [1] Dassault Systèmes. Abaqus, 2021.
- [2] Luís Peixoto. Validação e otimização estrutural de um depósito de gasolina para uma moto de todo-o-terreno. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2018.
- [3] Miguel Oliveira. *Validação estrutural de um novo conceito de chassis de motociclo*. PhD thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [4] Joel Rodrigues Couto. Análise acoplada com dinâmica de multicorpo e com elementos finitos Aplicação a uma estrutura de um motociclo. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.
- [5] Ajp galp 50 supermotard gallery, 08/2021. URL <http://moto.zombdrive.com/ajp/ajp-galp-50-supermotard/>.
- [6] Diogo Valentim Rechená. Motorcycle chassis analysis Engenharia Mecânica Júri. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, 2014.
- [7] Pr4, 08/2021. URL <https://ajpmotos.com/pt-pt/products/pr4-124-enduro-pro>.
- [8] Ajp pr3, 08/2021. URL <https://www.motoluar.com/ajp/pr3/>.
- [9] Ajp pr5 250 supermoto 2014 - 2015, 08/2021. URL https://www.autoevolution.com/moto/ajp-pr5-250-supermoto-2014.html#aeng_ajp-pr5-250-supermoto-3000-249-1.
- [10] Spr 250, 08/2021. URL <https://ajpmotos.com/collections/enduro/products/spr-250-enduro>.
- [11] Calos Filipe Vieira. Structural Evaluation of a Motorcycle Frame. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [12] Autodesk. Inventor Professional 2020, 2020.