



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica



**Desenvolvimento de uma plataforma móvel de apoio à
execução de tarefas de manutenção de um Airbus A320**

DANIEL SOUSA HONÓRIO
Licenciado em Engenharia Mecânica

Trabalho de projeto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador(es):

Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão
Professor Doutor Hugo Alexandre Freixial Argente dos Santos
Professor Especialista Pedro Miguel Rodrigues de Costa

Júri:

Presidente: Grau e Nome

Vogais:

Grau e Nome

Grau e Nome

Grau e Nome

Setembro de 2023

Página intencionalmente deixada em branco



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica

**Desenvolvimento de uma plataforma móvel de apoio à
execução de tarefas de manutenção de um Airbus A320**

DANIEL SOUSA HONÓRIO
Licenciado em Engenharia Mecânica

Trabalho de projeto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador(es):

Professor Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão
Professor Doutor Hugo Alexandre Freixial Argente dos Santos
Professor Especialista Pedro Miguel Rodrigues de Costa

Júri:

Presidente: Grau e Nome

Vogais:

Grau e Nome

Grau e Nome

Grau e Nome

Setembro de 2023

Página intencionalmente deixada em branco

Resumo

A evolução das coisas está conectada com a vontade do ser humano em fazer mais e melhor e essa vontade, em engenharia, chama-se melhoria contínua. A indústria aeronáutica sempre foi fértil em promover várias ações de melhoria contínua. O presente trabalho consiste numa ação de melhoria na indústria aeronáutica, enquadrando-se numa oportunidade de melhoria contínua observada na forma como são realizadas as tarefas de manutenção num airbus A320. É um trabalho que destaca o pensamento criativo na engenharia enquanto processo evolutivo e não como um processo instantâneo.

É apresentada a importância de uma organização, nos dias que correm, se manter em constante melhoria de forma a não perder vantagem sobre os seus concorrentes. Aborda-se ainda a forma como a manutenção evoluiu e os benefícios que essa evolução trouxe para a indústria, particularmente para a indústria aeronáutica.

O objetivo do presente trabalho é desenvolver uma plataforma móvel que ajudará na realização das tarefas de manutenção de um airbus A320. Ajudará, pois, simplificar o método utilizado atualmente para a realização das tarefas de manutenção, deixando de ser necessário o transporte manual do material dentro do avião, podendo colocar-se este na plataforma móvel, deslocando-se a mesma.

A plataforma móvel projetada é constituída por madeira de balsa e uma liga de alumínio Alloy 2018 que se move sobre as calhas de um airbus A320 com a ajuda de seis rodas fisicamente ligadas à plataforma. Desenvolver esta plataforma diminuirá o risco para os técnicos que, assim já podem deslocar-se dentro do avião sem carregar o material para as tarefas de manutenção. Foi, ainda, adicionado um sistema de travagem às plataformas que permite que estas consigam funcionar de forma independente.

Palavras-chave: Melhoria contínua; Manutenção; Manutenção aeronáutica; Plataforma móvel

Abstract

The evolution of things relates to the desire of human beings to do more and better and this desire, in engineering, is called continuous improvement. The aeronautical industry has always had several continuous improvement actions. This work consists of an improvement action in the aeronautical industry, as part of an opportunity for continuous improvement that was observed in the way maintenance tasks are carried out on an airbus A320. It is a work that highlights creative thinking in engineering as an instantaneous process.

The literature review presents the importance of an organization, nowadays, maintaining constant improvement so as not to lose an advantage over its competitors. Also talks about the way maintenance has evolved and the benefits that this evolution has brought to the industry, particularly the aeronautical industry.

The objective of this work is the development of a mobile platform that will help carry out maintenance tasks on an airbus A320. It will therefore help to simplify the method currently used to carry out maintenance tasks, making it no longer necessary to manually transport the material inside the aircraft, allowing it to be placed on the mobile platform by dragging it.

The design platform consists of balsa wood and an Alloy 2018 aluminum alloy that moves on the rails of an airbus A320 with the help of six wheels physically attached to the platform. The development of this platform reduces the risk for technicians, who can now move inside the aircraft without carrying material for maintenance tasks. A braking system was also added to the platform that allows them to operate independently.

Keywords: Continuous improvement; Maintenance; Aeronautical maintenance; Mobile platform

Lista de siglas e acrónimos

MSG – Maintenance steering group

HT – Hard time

OC – On condition

CM – Condition monitoring

ATA – Air Transport association

FAA – Federal aviation administration

IPC – Illustrated parts catalogue

AMM – Airplane maintenance manual

SRM – Structural repair manual

MPD – Maintenance planning manual

DOA – Design organization approvals

EASA – European Union Aviation Safety Agency

UE – União europeia

PDCA – Plan-Do-Check-Act

TQM – Total quality management

SS – Six sigma

MPa – Megapascal

GPa – Gigapascal

Kg – Quilograma

g- Grama

mm – milímetros

Kg/m³ – Quilograma por metro cúbico

N – Newton

CS – Coeficiente de segurança

Índice de figuras

Figura 1 – Evolução da manutenção. [3]	3
Figura 2 –Tipos de manutenção. [3]	3
Figura 3 - Mudança disruptiva vs mudança contínua. Adaptado de [9]	12
Figura 4 - Muda, Mura e Muri. Adaptado de [7]	14
Figura 5 - Jogo de cores de colocação das placas de contraplacado. a) Disposição das placas dentro do avião. b) Placa de contraplacado.....	16
Figura 6 - Placas usadas atualmente com a respetiva numeração.....	17
Figura 7 - Placas usadas atualmente com diversas formas.	17
Figura 8 - Placas usadas atualmente com diversos tamanhos.....	17
Figura 9 - Disposição das placas de contraplacado.....	18
Figura 10 - Disposição das placas de contraplacado durante as tarefas de manutenção. a) Procedimento projetado. b) Procedimento praticado.	19
Figura 11 – Aspeto da malha sólida. [13]	22
Figura 12 – Aspeto da malha de “casca”. [13].....	22
Figura 13 - Modelo estrutural simplificado da plataforma móvel.	23
Figura 14 - Diagrama de corpo livre simplificado da plataforma móvel.	24
Figura 15 - Mapa de distribuição de tensões de von Mises obtido com a aplicação de três cargas de 50 kg num “corpo de Plataforma” de 9 mm de espessura, em madeira de balsa.....	29
Figura 16 - Mapa de distribuição de tensões de von Mises obtido com a aplicação de três cargas de 50 kg num “corpo de Plataforma” de 1 mm de espessura, em aço AISI 1020.....	31
Figura 17 - Mapa de distribuição de tensões de von Mises obtido com a aplicação de três cargas de 50 kg num “corpo de Plataforma” de 2 mm de espessura, numa liga de alumínio alloy 2018.....	33
Figura 18 - Mapa de distribuição de tensões de von Mises obtido com a aplicação de três cargas de 50 kg num “corpo de Plataforma” de 2 mm de espessura, numa liga de alumínio alloy 2018 e 9 mm de espessura em madeira de balsa. a) vista inferior. b) vista superior.....	34
Figura 19 - Mapa de distribuição de tensões de von Mises obtido com a aplicação de três cargas de 50 kg num “corpo de Plataforma” otimizado de 2 mm de espessura, numa liga de alumínio alloy 2018 e 8 mm de espessura em madeira de balsa. a) vista inferior. b) vista superior.....	35
Figura 20 - Processo evolutivo do corpo da plataforma - a) Corpo da plataforma em madeira de balsa, b) Corpo da plataforma em aço, c) Corpo da plataforma em liga de alumínio, d) Corpo da plataforma em madeira de balsa e liga de alumínio, e) Corpo da plataforma em madeira de Balsa e liga de alumínio otimizado (escolha final).....	36
Figura 21 – Dimensões da calha no local onde apoiam as rodas.	37

Figura 22 - Descrição da estrutura da roda segundo a empresa Elesa. Adaptado de [17]	38
Figura 23 - Dimensões da roda RE.C7-050-PBL. Adaptado de [17].....	38
Figura 24 - Roda RE.C7-050-PBL modelada no programa Solidworks.	39
Figura 25 - Descrição dos parafusos que unem as rodas ao "corpo da plataforma".	40
Figura 26 – Disposição das rodas no modelo com 8 rodas.	43
Figura 27 - Modelo de plataforma com 8 rodas. a) vista isométrica. b) vista lateral com inclinação. c) vista lateral. d) vista frontal.	43
Figura 28 - Tensão máxima de von Mises observada na plataforma com 8 rodas.	44
Figura 29 - Valor e localização de deformada máxima observada numa plataforma com 8 rodas.	44
Figura 30 - Condição dos parafusos após estudo com 8 rodas.	45
Figura 31 - Parafuso com o menor coeficiente de segurança calculado no estudo com 8 rodas.....	45
Figura 32 - Modelo de plataforma com 6 rodas. a) vista isométrica. b) vista lateral com inclinação. c) vista lateral. d) vista frontal.	46
Figura 33 – Valor e localização de deformada máxima observada numa plataforma com 6 rodas.	47
Figura 34 - Tensão máxima de von Mises observada na plataforma com 6 rodas. a) vista geral. b) vista ampliada.	47
Figura 35 - Condição dos parafusos após estudo com 6 rodas.	48
Figura 36 - Tensão máxima de von Mises observada na plataforma com 4 rodas.	49
Figura 37 - Valor e localização de deformada máxima observada numa plataforma com 4 rodas.	50
Figura 38 - Condição dos parafusos após estudo com 4 rodas.	50
Figura 39 - Localização da roda utilizada para comparação de resultados de coeficiente de segurança calculados. a) modelo com 8 rodas. b) modelo com 6 rodas. c) modelo com 4 rodas.	51
Figura 40 - Sistema de travagem da plataforma móvel.....	53
Figura 41 - Vista superior da calha onde assenta a plataforma.	53
Figura 42 - Plataforma com suporte de ajuda à deslocação. a) modelo com suporte na posição de utilização. b) modelo com suporte fechado.	54
Figura 43 - Local de fixação do suporte de ajuda à deslocação.	54
Figura 44 - Localização dos avisos pintados na plataforma.	55
Figura 45 - Comparação de refinamento de malha no estudo final e no estudo dos apoios da plataforma. a) aspeto da malha no estudo final. b) aspeto da malha no estudo dos apoios da plataforma. c) aspeto da malha na roda no estudo final. d) aspeto da malha na roda no estudo dos apoios da Plataforma. e) Detalhes da malha no estudo final. f) Detalhes da malha no estudo dos apoios da plataforma.....	56

Figura 46 - Plataforma móvel renderizada. a) Plataforma montada (vista lateral esquerda). b) Plataforma montada (vista lateral direita). c) Plataforma montada (vista de planta). d) Plataforma fechada (vista lateral esquerda)..... 58

Índice de tabelas

Tabela 1 – Determinação da localização das cargas para averiguação de caso crítico.	25
Tabela 2 – Propriedades mecânicas da madeira de balsa [14].	28
Tabela 3 - Comparação de resultados dos estudos realizados para diferentes espessuras em madeira de balsa.	30
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço AISI 1020 [15].....	30
Tabela 5 - Comparação de resultados dos estudos realizados para diferentes espessuras em aço AISI 1020.	32
Tabela 6 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio alloy 2018 [16].	32
Tabela 7 - Comparação de resultados dos estudos realizados para diferentes espessuras numa liga de alumínio alloy 2018.	33
Tabela 8 - Valores da otimização do "corpo de plataforma" Madeira de balsa – Liga de Alumínio alloy 2018.	36
Tabela 9 - Propriedades mecânicas de Poliamida com reforço de fibra de vidro [18].	39
Tabela 10 - Propriedades mecânicas do aço AISI 1020.	39
Tabela 11 - Comparação de valores de coeficiente de segurança calculado para uma roda comum nos três estudos estando mais próxima das cargas aplicadas.	51
Tabela 12 - Comparação dos valores desejados e dos valores obtidos.	57
Tabela 13 - Valores de coeficiente de segurança mínimo comparativamente com os valores de coeficiente de segurança calculados dos parafusos.	57

Índice

1. Introdução.....	1
2. Enquadramento teórico.....	2
2.1 Manutenção aeronáutica.....	2
2.1.1. Manutenção.....	2
2.1.2. Desenvolvimento da manutenção aeronáutica.....	4
2.1.3. Regulamentos, normas e certificados na manutenção aeronáutica.....	8
2.2. Melhoria contínua.....	10
2.2.1. Ferramentas de melhoria contínua.....	12
2.2.2. Melhoria contínua na indústria aeronáutica.....	15
3. Estado atual.....	16
3.1. Procedimento projetado.....	16
3.2. Limitações do procedimento projetado.....	18
3.3. Procedimento praticado.....	19
4. Projeto.....	21
4.1. Condições de projeto.....	21
4.1.1. Software utilizado.....	21
4.1.2. Malha utilizada.....	21
4.1.3. Apoios.....	23
4.1.4. Cargas aplicadas.....	24
4.2. Desenvolvimento da plataforma.....	27
4.2.1. Corpo da plataforma.....	28
4.2.2. Apoios da plataforma.....	37
4.2.3. Sistema de travagem.....	52
4.2.4. Suporte de apoio à deslocação.....	54
4.2.5. Avisos gerais na plataforma.....	55
4.2.6. Estudo final.....	56

5. Conclusão.....	59
5.1. Limitações ao trabalho projetado.....	60
5.2. Propostas de trabalho futuro	60
6. Referências bibliográficas	61

Apêndice I. Forças e momentos sentidos em cada parafuso nos estudos realizados com 8, 6 e 4 rodas, respectivamente

1. Introdução

A mudança, quando existe um método com procedimentos muito bem definidos há anos, é bastante difícil. No entanto, esta deve fazer parte das nossas vidas, quer a nível profissional quer a nível pessoal, pois só assim é que é possível crescer e evoluir. Atualmente, a melhoria contínua é algo muito presente nas organizações devido à elevada competitividade organizacional existente; se uma organização não se mantiver competitiva acaba por ficar para trás. Uma das formas de uma organização se manter competitiva é avaliar onde estão os desperdícios nos seus processos e tentar reduzi-los.

O objetivo do presente trabalho é projetar uma plataforma móvel que ajudará nas tarefas de manutenção de um airbus A320, reduzindo o tempo desperdiçado na colocação das placas de contraplacado existentes e tornando o processo mais *Lean*. Também tem como objetivo o aumento da segurança dos técnicos dentro do avião pois estes já não necessitarão de carregar o material podendo colocá-lo na plataforma e movendo a mesma.

O trabalho está dividido em cinco capítulos com diversos subcapítulos. O primeiro capítulo é um enquadramento teórico que se divide em dois subcapítulos. O primeiro subcapítulo explica o que é a manutenção, como um todo, aprofundando um pouco sobre o que é a manutenção na indústria aeronáutica. É um subcapítulo teórico que ajuda o leitor a entender a base do trabalho, pois a plataforma que está a ser projetada deve-se à existência de manutenção aeronáutica. Seguidamente, segue-se um subcapítulo sobre melhoria contínua servindo como fundamento para o trabalho realizado, dado o trabalho se enquadrar numa oportunidade de melhoria. No segundo capítulo aborda-se e explica-se a forma como são realizadas atualmente as tarefas de manutenção, explicando a diferença entre o método projetado pela airbus para a realização das tarefas de manutenção e o método praticado. Para finalizar, conclui-se com o capítulo central do trabalho que é o projeto. Neste capítulo explica-se o processo evolutivo de projetar a plataforma bem como as fases pelas quais esta passou até à sua fase final.

2. Enquadramento teórico

Este capítulo auxilia o leitor a entender a teoria por trás da necessidade de se projetar uma plataforma móvel. Divide-se em dois subcapítulos sendo estes a manutenção aeronáutica e a melhoria contínua.

2.1 Manutenção aeronáutica

No subcapítulo da manutenção aeronáutica aborda-se o que é a manutenção, no geral, explicando a necessidade de esta existir e a sua evolução ao longo dos anos. Divide-se em três subcapítulos explicando um pouco a forma como se realiza a manutenção na indústria aeronáutica, bem como de alguns dos seus regulamentos, normas e certificados.

2.1.1. Manutenção

Manutenção é uma palavra que deriva do latim *manu tentiōne* [1], ato de manter o que se tem e preservar o que é nosso. A manutenção é um aspeto crucial de qualquer indústria, pois é o processo que garante que os bens tais como os equipamentos e instalações são mantidos em boas condições de funcionamento. É essencial garantir que os equipamentos e instalações estão em boas condições de utilização para se poderem realizar os processos afetos à indústria sem problemas e de forma eficiente e eficaz. Mantendo os equipamentos e instalações com a devida manutenção é possível evitar-se quebras que podem levar a paragens de produção ou de processos e, em casos mais graves, a perda de equipamentos e aumento significativo de custos.

A norma EN 13306:2001[2] define manutenção como sendo a “Combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida”.

A manutenção, como é conhecida atualmente, foi sofrendo alterações ao longo dos anos. Já desde os tempos primordiais que o ser humano entende que as peças necessitavam de ser trocadas para terem uma vida útil maior, mas com o avançar dos anos foram surgindo novas necessidades e, como tudo, a manutenção foi sofrendo alterações e foi-se adaptando. Moubrey [3], distingue três gerações na evolução da manutenção, como é possível observar na Figura 1.



Figura 1 – Evolução da manutenção. [3]

A primeira geração acontece antes da segunda guerra mundial onde as organizações apenas reparavam os equipamentos quando estes avariavam. Por volta dos anos cinquenta e com o aparecimento cada vez maior de automatização de processos, as organizações começaram a preocupar-se mais com as avarias dos seus equipamentos, pois cada avaria faria com que o processo fosse interrompido, dando prejuízo à organização. Na terceira geração já se realiza uma manutenção sem ter ocorrido uma avaria, ou seja, uma manutenção preventiva que permite às organizações terem uma maior fiabilidade sobre os seus processos.

Existem vários tipos de manutenção que as organizações podem realizar sendo que cada organização não se cinge apenas a um tipo de manutenção, mas sim a uma conjugação de diversos tipos. Na Figura 2, podem ver-se os diversos tipos de manutenção.

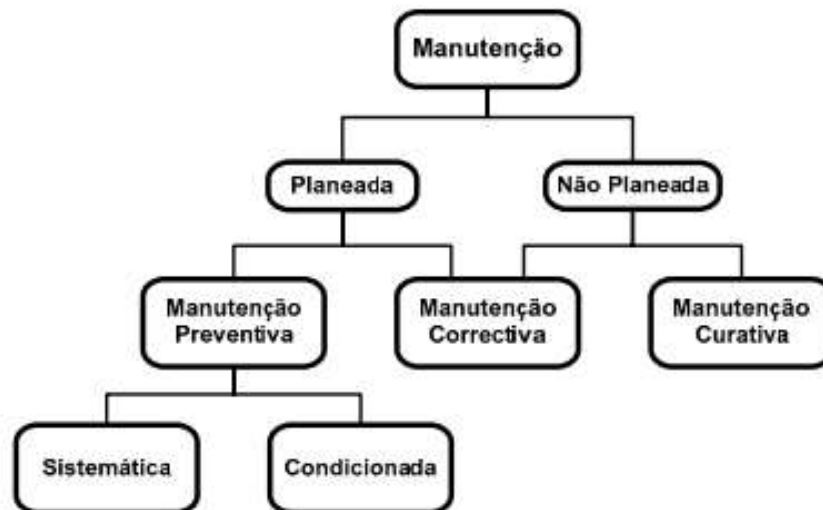


Figura 2 – Tipos de manutenção. [3]

Manutenção preventiva sistemática:

“Manutenção preventiva efectuada a intervalos de tempo pré-estabelecidos ou segundo um número definido de unidades de utilização, mas sem controlo prévio do estado do bem.” [2].

Envolve a paragem dos equipamentos para inspeção e manutenção regular do equipamento de forma a evitar que a avaria aconteça. Este tipo de manutenção, geralmente, é agendado consoante o tempo de utilização e costuma envolver tarefas como lubrificação, limpeza e substituição de componentes.

Manutenção preventiva condicionada:

“Manutenção preventiva baseada na vigilância do funcionamento do bem e/ou dos parâmetros significativos desse funcionamento, integrando as acções daí decorrentes.” [2].

Envolve a análise do funcionamento dos equipamentos e mede periodicamente parâmetros do mesmo, sendo assim possível saber a sua condição e quando realizar a manutenção.

Manutenção corretiva:

“É a manutenção efectuada depois da detecção de uma avaria, e destinada a repor o bem num estado que possa realizar uma função requerida.” [2].

A manutenção corretiva pode ser planeada ou não planeada consistindo na substituição ou reparação do equipamento após a ocorrência da avaria. Este tipo de manutenção, nesta geração, é o menos utilizado, no entanto existem avarias que não se preveem tendo a manutenção corretiva de ser utilizada.

2.1.2. Desenvolvimento da manutenção aeronáutica

Naturalmente, a indústria aeronáutica não é estanque, mas sim uma indústria em constante mudança e sempre à procura de melhorar, quer seja através dos componentes quer seja através da forma como é realizada a manutenção dos mesmos.

Os componentes, com o decorrer dos anos, têm vindo a melhorar a sua fiabilidade e o seu desempenho e, embora essa evolução aconteça, os mesmos continuam a precisar de manutenção, não sendo a indústria aeronáutica exceção relativamente a todas as outras indústrias.

A forma como são realizados os programas de manutenção tem vindo a alterar-se e a ajustar-se consoante o período em que nos encontramos. A companhia Boeing iniciou, com o avião Boeing 747, uma nova abordagem conhecida como *Maintenance Steering Group* (MSG). Por volta dos anos 70 a aviação comercial sofreu algumas alterações tendo aparecido os primeiros grandes aviões comerciais e, por isso, a Boeing sentiu que era necessário melhorar os seus programas de manutenção. Esta nova forma de realizar programas de manutenção ficou conhecida como *bottom up*, ou seja, do componente mais pequeno para o sistema num todo. Analisa que componentes é que, falhando, causariam a falha do sistema. Depois de feita esta análise determinava-se que componentes pertenciam ao grupo dos componentes hard time (HT), *on condition* (OC) ou *condition monitoring* (CM) [4].

Hard Time – Hard time é um processo de manutenção preventiva que implica que o componente em causa seja retirado do avião para fazer revisão, ser restaurado ou até mesmo substituído antes de este atingir o intervalo específico de utilização para o qual foi projetado. O intervalo com que se realizam as manutenções hard time podem ser definidas através de tempo de calendário, por ciclos, número de horas, voos específicos (voar sobre o mar, etc...) ou numa conjugação com outro processo como, por exemplo, o *On Condition*. Este tipo de manutenção servia para manter sempre os componentes abaixo do número de horas a que era expectável que o componente falhasse, sendo que assim, na teoria, o componente nunca falharia dando segurança à companhia que aplicava este tipo de processo aos seus componentes. É uma manutenção também aplicada a componentes fulcrais e que podem pôr em risco a segurança, por exemplo, alguns componentes no trem de aterragem e motor são controlados com base na manutenção hard time, são componentes denominados de componentes de vida limitada [4].

On Condition – *On Condition* é um processo de manutenção preventiva que implica que o componente será inspecionado e testado periodicamente para se averiguar se este ainda tem capacidade de realizar a sua função sem pôr o sistema em risco. Se o componente falhar nos testes ou na inspeção deverá ser restaurado ou substituído de forma a repor a qualidade do componente para mais horas de voo. Os componentes que fazem parte deste tipo de manutenção devem ser

componentes que possam realizar os testes dentro dos tempos limites das manutenções sem afetar a aeronavegabilidade do avião e sem ter se fazer testes muito avançados e demorados [4].

Condition monitoring – *Condition monitoring* é aplicado quando nem o processo Hard Time nem o On Condition pode ser aplicado. O processo de *Condition Monitoring* envolve a monitorização dos componentes, as taxas de falhas, remoções, etc... serve para componentes que “não têm um tempo de vida” ou que o seu tempo de vida é muito superior ao que vai ser usado pelo avião. Contrariamente ao Hard Time e ao *On Condition* o *Condition Monitoring* não é um processo de manutenção preventiva. Os componentes que estão sobre a manutenção do tipo *Condition Monitoring*, não têm testes nem inspeções pois eles funcionam até à falha e não podem pôr em risco a segurança do avião [4].

A *Air Transport Association* ATA, declara que os componentes em *Condition Monitoring* têm de obedecer às seguintes regras [4]:

1. Não pode ter influência direta na segurança do avião.
2. Não pode ter nenhuma função escondida, que não seja evidente e possa colocar em risco o avião.
3. O componente tem de estar incluído no programa de *Condition Monitoring* do operador, ou seja, tem de haver dados sobre a sua fiabilidade para se entender melhor o seu comportamento.

Normalmente os componentes que estão sobre *Condition Monitoring* são componentes de navegação, luzes, entre outros.

Pode também ser usado em conjugação com o Hard Time e com o *On Condition* para melhor prever os tempos em que se devem fazer as intervenções pois o *Condition Monitoring* funciona na base da recolha e análise de dados.

MSG-2

No início dos anos 70 e com a evolução dos programas de manutenção o MSG sofreu pequenas alterações dando origem ao MSG-2. A maior diferença entre o processo MSG e MSG-2 são as consideradas áreas das tarefas de manutenção. Enquanto no MSG as áreas eram estruturas,

sistemas mecânicos, motores, sistemas elétricos, controles de voo, hidráulicos e zona; no MSG-2 reduziram-se as áreas e passaram estas a ser, sistemas e componentes, estruturas e motores.

O processo MSG-2 continua a ser um processo do tipo *bottom-up* que, como explicado anteriormente, se preocupa com o componente de uma forma individual e não com o sistema como sendo um todo [4].

MSG-3

O processo MSG-3, utilizado atualmente, é uma modificação e melhoria do processo MSG-2. No processo MSG-3 a abordagem deixa de ser “*bottom-up*”, do componente para o sistema, para passar a ser “*top-down*”, onde a falha é analisada do maior sistema possível para o componente. A lógica usada no processo MSG-3 é a de que se devem identificar as melhores alturas para as tarefas de manutenção de forma a evitar que ocorram falhas e de forma que o sistema mantenha sempre o nível de fiabilidade. O processo MSG-3 não se preocupa se um componente falha, mas sim se essa falha vai ou não afetar a operação. A falha é atribuída a duas categorias básicas: segurança e economia.

Foram desenvolvidas três áreas de tarefas de manutenção quando do desenvolvimento do processo MSG-3, sendo estas: tarefas no sistema da fuselagem, tarefas de componentes estruturais e tarefas de zona.

Realça-se as tarefas de manutenção que dizem respeito à parte estrutural do avião. Segundo o MSG-3, a estrutura do avião está sujeita a três tipos de deterioração [4].

- 1- Deterioração ambiental – isto é, a deterioração da resistência de um componente por interação química com o meio ambiente [4]
- 2- Dano acidental – isto é, a deterioração física de um componente causada pelo contacto com outro objeto que não é parte constituinte do avião, resultado de um erro humano que ocorreu durante o processo de fabrico, utilização de um veículo ou durante as tarefas de manutenção [4]
- 3- Dano por fadiga – isto é, o dano que qualquer componente sofre ao passar por esforços cíclicos que leva à propagação de fendas [4]

Para combater estes tipos de deterioração existem, também, contempladas no MSG-3 certas tarefas de manutenção para eliminar ou minimizar acidentes futuros. Estes tipos de inspeção têm diferentes níveis de detalhe. O processo MSG-3 define três tipos de inspeção estrutural:

Inspeção visual geral – é o tipo de inspeção mais rudimentar e consiste no apoio visual para se detetarem falhas de nível visível. Esta inspeção pode necessitar que se removam portas ou painéis para se aceder à parte estrutural do avião. Pode ainda necessitar que se utilizem plataformas ou escadotes para facilitar a visualização de certos componentes estruturais [4]

Inspeção detalhada – é bastante similar à inspeção visual geral, no entanto é necessária iluminação adequada, por vezes espelhos e lentes, para se conseguir observar com mais detalhe alguma falha que exista. Pode ainda ser necessário a limpeza prévia do local de observação [4]

Inspeção detalhada especial – são inspeções intensivas de locais da estrutura específicos. É semelhante à inspeção detalhada, mas com a adição de algumas técnicas. Esta inspeção pode fazer recurso de inspeções não destrutivas: líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrassom, correntes de Eddy, etc. Este tipo de inspeção também pode requerer a desmontagem de algumas partes da estrutura [4]

O processo MSG-3 depois de analisado serve para as empresas que fabricam os aviões criarem os programas de manutenção específicos para cada avião. Após criados os programas, os técnicos que vão realizar as tarefas de manutenção, têm de cumprir o que está escrito no programa, pois este foi criado com base no MSG-3 pela empresa que fabricou o avião tendo sido posteriormente aprovado pela FAA (*federal aviation administration*).

O MSG-3 é o processo usado atualmente. No entanto, está em constante mudança e melhoria para acompanhar as outras indústrias.

2.1.3. Regulamentos, normas e certificados na manutenção aeronáutica

A indústria aeronáutica é uma indústria que trabalha diretamente com pessoas, quer seja quem trabalha nesta ou quem dela usufrua. Assim, é uma indústria em que todo o cuidado é pouco e, como tal, isto leva a que exista muita documentação, normas e regulamentos associados [4] Nos últimos anos, com o avanço das tecnologias, a documentação tem sido cada vez mais digitalizada facilitando assim o acesso à mesma.

O fabricante fornece a documentação necessária para uma companhia aérea realizar a manutenção dos seus aviões podendo, por vezes, estes documentos ser personalizados para cada companhia. Documentos como o IPC (*Illustrated Parts Catalogue*) são normalmente personalizados segundo um valor pago pela companhia, sendo que outros como o AMM (*Airplane Maintenance Manual*), SRM (*Structural Repair Manual*) ou MPD (*Maintenance Planning Data*) costumam ser genéricos para todas as companhias [4].

Um certificado bastante relevante na indústria é o DOA (*Design Organisation Approvals*) que é o certificado que permite a uma companhia aérea fazer alterações num avião. Para se obter este certificado é preciso concorrer junto da EASA (*European Union Aviation Safety Agency*) que é um organismo da união europeia que visa promover os mais elevados padrões de segurança e proteção ambiental na aviação da UE [5]

2.2. Melhoria contínua

Neste capítulo explica-se o fundamento do trabalho realizado, falando da necessidade de existir melhoria contínua num ambiente organizacional. Começa com uma breve explicação sobre este conceito, passando para um subcapítulo onde se fala de algumas das ferramentas utilizadas pelas organizações para se manterem em melhoria contínua. Para terminar, existe um subcapítulo que fala, de uma forma breve, de ações neste sentido na indústria aeronáutica.

No século XXI tem-se notado uma rápida mudança no que toca à competitividade entre empresas. Esta competitividade tem aumentado comparativamente com o passado pois há mais empresas no mercado e, mais importante, empresas com ideias novas/inovadoras e, por vezes, muito criativas e fora do expectável [6].

Quando se fala de melhoria contínua pensa-se logo na empresa japonesa Toyota. Foi no Japão, mais concretamente na empresa Toyota, que se começaram a dar os primeiros passos em direção ao que chamamos hoje de melhoria contínua.

A necessidade de uma empresa se manter em melhoria contínua advém do facto de atualmente a competitividade dentro de uma indústria ser bastante elevada. Há empresas que, periodicamente, não têm necessidade de se preocuparem nesta área, ou por serem as primeiras a atuar no mercado ou por estarem relativamente mais bem posicionadas que as outras empresas dentro da sua indústria [7]. No entanto, a maioria das empresas não consegue a conjuntura ideal para se situar na dianteira e necessita de estar constantemente a tentar melhorar e inovar para não ser ultrapassada. Na indústria aeronáutica, com o avanço da tecnologia e com o número crescente de pessoas que desta usufruem, esta situação ainda se agrava mais.

As empresas têm de ser bem-sucedidas em diversas áreas, tais como, inovação de produtos, fornecimento e produção. Estas áreas são as que normalmente estão sobre medidas de melhoria contínua [7].

Mas, afinal, o que é melhoria contínua? Melhoria contínua é uma abordagem sistemática que serve para melhorar processos, produtos ou serviços. Na base da melhoria contínua está a identificação de setores a melhorar, a realização de pequenas mudanças e a verificação do efeito operado, ou não, por essas mudanças.

São realizadas pequenas mudanças com o objetivo de melhor responder às exigências do mercado. Por vezes, é mais eficaz realizar-se pequenas mudanças ao invés de grandes mudanças, pois são mais fáceis de aplicar e avaliar, assim como mais facilmente aceites pelos trabalhadores [8]. Outro princípio fundamental da melhoria contínua é o de que tem de manter-se toda a informação guardada para se conseguir comparar e averiguar onde podem ser melhorados processos.

O envolvimento dos trabalhadores também é visto como fundamental para uma empresa que queira melhorar, isto porque são os trabalhadores que mais estão em contacto com os processos e produtos e terão certamente uma visão diferente de quem não trabalha com os mesmos. Devem ser, portanto, incentivados a dar ideias e sugestões que entendam que vão ajudar a empresa a melhorar.

Um dos princípios mais importantes da melhoria contínua é o de avaliar-se o que se pôs em prática e averiguar se realmente está a ser vantajoso para a empresa. Se o que se colocou em prática está a ser vantajoso para a empresa, devem ser feitas normas que ajudem ao processo de aplicação desses novos métodos de forma a manter a consistência na aplicação dos mesmos. Deve, também, ser um processo contínuo e não um projeto de uma única vez. Quando bem realizada, a melhoria contínua deve ser incremental e contínua, tal como o nome indica [8].

Também é importante referir, que o principal objetivo da melhoria contínua é fazer com que o cliente fique mais satisfeito pelo serviço prestado ou produto fornecido, logo, este é essencial e deve ser envolvido quando se pensa em realizar uma melhoria. Uma empresa que aplique estes princípios no seu “modus operandi” estará certamente mais disponível à mudança, à competição organizacional, à redução de desperdícios e irá criar um ambiente mais propício ao crescimento e ao sucesso da empresa [8]

2.2.1. Ferramentas de melhoria contínua

Existem diversas ferramentas que ajudam a colocar os princípios anteriormente apresentados em prática. Uma das ferramentas usadas para se perseguir melhoria contínua é o *kaizen*. O termo *kaizen* ouve-se muitas vezes associado à expressão melhoria contínua, isto porque, *kaizen*, significa melhoria contínua em japonês, sendo que “kai” significa mudança e “zen” para melhor [7], [8]. O *kaizen* baseia-se em pequenas mudanças que têm como objetivo a melhoria contínua. Estas mudanças não devem ser demasiado disruptivas para não serem recusadas pelos trabalhadores [9]. Isto não quer dizer que não existam mudanças disruptivas, ambos os casos provaram ser eficazes, como é possível verificar na Figura 3, ambos os casos têm o mesmo resultado [9].

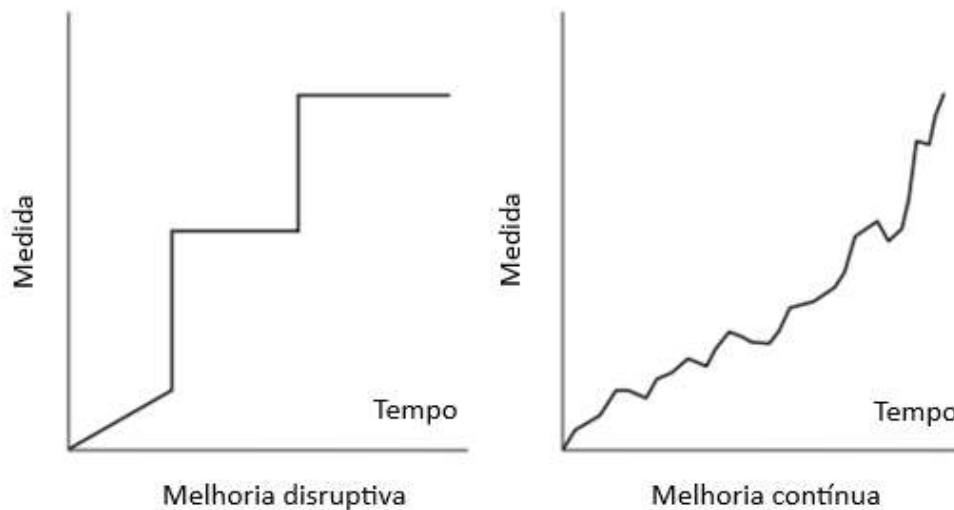


Figura 3 - Mudança disruptiva vs mudança contínua. Adaptado de [9]

Um dos modelos mais usados por empresas com certas ferramentas de melhoria contínua, tais como, o *Lean* e o *Six Sigma*, é o ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*). O modelo PDCA ajuda as empresas a seguirem uma linha lógica de pensamento que torna mais simples a aplicação de ações que irão levar à melhoria [8]–[10]. O ciclo PDCA é composto por quatro fases [10]

Planeamento (*Plan*) – Consiste na identificação de uma oportunidade de melhoria e no planeamento da mudança.

Fazer (*Do*) – Implementação da mudança.

Verificação (*Check*) – Utilização dos dados recolhidos para verificar se a mudança atuou.

Agir (Act) – Verificar se a mudança fez efeito. Se fez efeito, aplicar numa escala maior; se não fez efeito, recomeçar o ciclo outra vez, ponderando novas hipóteses de mudança.

O ciclo PDCA foi criado nos anos 30 do século passado e foi bastante usado com a ferramenta TQM (*Total Quality Management*) que foi bastante popular nos anos 80 e 90 [6]. TQM é uma ferramenta de gestão para o sucesso a longo prazo de uma empresa que se baseia na satisfação do cliente. Um dos principais elementos do TQM é, sendo que o principal foco numa gestão através de TQM é o cliente, este determina o nível de qualidade que quer para o seu produto/serviço [11].

Outra ferramenta bastante utilizada pelas empresas é o *Six Sigma* (SS), que significa seis sigma, uma referência ao desvio padrão de um produto a analisar. SS foi criada pela Motorola em 1981 com o objetivo de reduzir os defeitos [10]. A ferramenta SS auxilia as empresas no aumento do desempenho e na diminuição da variação do processo, que ajuda a reduzir os defeitos e melhorar os lucros. Envolve a análise de processos, de dados para identificar onde ocorreram as falhas e a implementação de soluções para minimizar variações [11].

A ferramenta que melhor descreve o projeto apresentado nesta tese é o *Lean*. O *Lean* é uma forma de pensamento que tem como objetivo a minimização de desperdícios. O *Lean* identifica o seguinte como as piores formas de desperdício [7], [10].

- Transporte desnecessário.
- Inventário em excesso (Todos os componentes que já foram terminados e não estão a ser processados).
- Deslocações desnecessárias.
- Tempo de espera.
- Sobreprodução.
- Subprodução.
- Defeitos.

Tempo de espera é considerado um desperdício porque, enquanto há trabalhadores à espera de material ou instruções não está a ser adicionado valor ao processo. Deslocações desnecessárias

também é outro desperdício contemplado, pois enquanto se realizam deslocações não existe valor a ser adicionado ao processo. É importante realçar que não existem processos, nem tarefas, que não impliquem tempos de espera e deslocações, no entanto o objetivo com o pensamento Lean é reduzi-las ao mínimo. O foco da metodologia *Lean* é ter as coisas certas, no momento certo, na quantidade certa enquanto se minimizam os desperdícios [10].

O *Lean* não se foca apenas nos aspetos físicos das empresas, mas também na forma como estas são geridas. *Lean thinking* e *Lean office* são variações do *Lean* que permitem a uma empresa simplificar manuais, processos, entre outros.

Nem todo o trabalho tem valor adicionado para o cliente e para se entender melhor esta questão foram reunidos os termos Muda, Mura e Muri. Muda significa os desperdícios, Mura significa o desnivelamento nos processos e Muri significa a sobrecarga de trabalhadores ou processos, como é possível observar na Figura 4 [7].

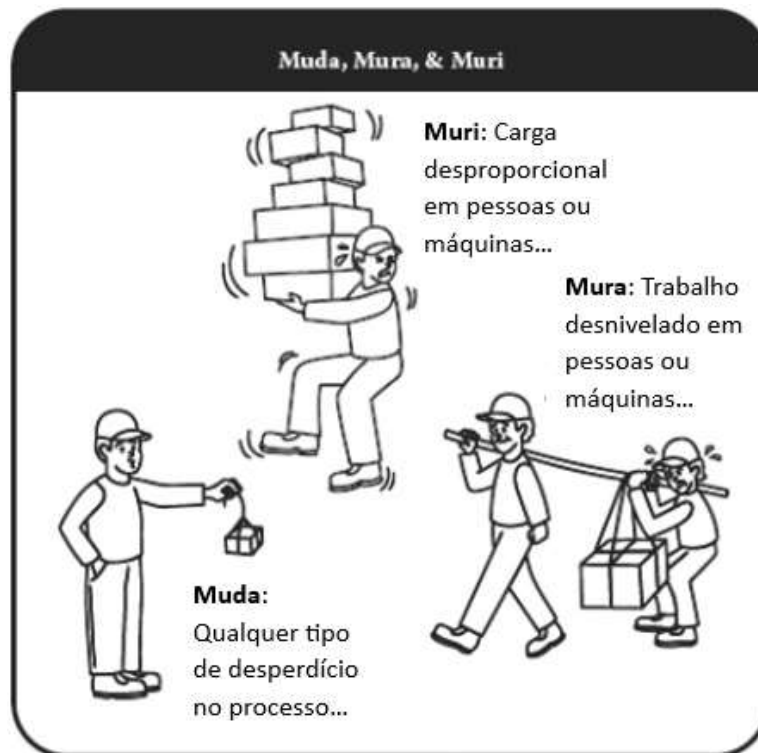


Figura 4 - Muda, Mura e Muri. Adaptado de [7]

2.2.2. Melhoria contínua na indústria aeronáutica

Diz-se, comumente, que a aviação nasceu no início do século XX com os irmãos Wright, mais concretamente no dia 17 de dezembro de 1903, onde se realizou o primeiro voo motorizado. No entanto, já se fala de viajar pelo mundo a voar desde o início do século XVII [12]. Foi a persistência e a vontade de se realizar este desejo que levou a que, nesse dia, se conseguisse realizar o primeiro voo motorizado.

O progresso feito, especialmente nos últimos 50 anos, na área da aeronáutica, é algo notável e isto deve-se em grande parte a todas as medidas de melhoria contínua que foram sendo aplicadas pelos fabricantes, empresas e indústria no geral. A aviação não seria o que é hoje se nos tivéssemos contentado com o avião projetado pelos irmãos Wright [12].

Nos últimos anos, a engenharia relativa a certos aspetos dos aviões tem-se mantido praticamente inalterada [12], embora sejam sempre feitas melhorias com o objetivo da otimização. Isto não significa que não tenham existido melhorias ao longo dos anos. Um exemplo disso são os motores dos aviões. No início da aviação, os motores dos aviões eram bastante ineficientes comparativamente aos motores de pistões já existentes na altura e foi no final dos anos 20, do século passado, que Frank Whittle [12] reparou que não seriam pequenas mudanças incrementais nos motores a pistões que iam alterar a aviação, mas sim, uma mudança disruptiva que iria alterar a forma como os motores dos aviões funcionavam. Foi assim que nasceram as primeiras ideias para os motores a jato [12] Outra das melhorias mais evidentes na aviação foi a mudança dos sistemas aviónicos, que deixaram de ser analógicos para passar a ser digitais.

Atualmente, o maior desenvolvimento provém das questões relativas à sustentabilidade e à forma como se tenta tornar as viagens, manutenções e produções de aviões o mais sustentável possível. As questões da qualidade de vida do planeta são, hoje, um motor para o desenvolvimento de novas soluções na indústria aeronáutica. É aí que reside o maior esforço de melhoria contínua na indústria aeronáutica, nos dias de hoje [12].

3. Estado atual

Este capítulo tem como objetivo dar ao leitor uma visão geral de como são realizadas as tarefas de manutenção atualmente, de forma a ser mais fácil a interpretação da melhoria que está a ser proposta neste projeto.

O capítulo divide-se em três subcapítulos que explicam o procedimento que foi projetado inicialmente pela airbus para a realização das tarefas de manutenção, passando para um subcapítulo que expõe as limitações desse procedimento projetado, acabando num subcapítulo que explica a forma como as tarefas são realizadas atualmente e em que diferem do que foi inicialmente projetado.

3.1. Procedimento projetado

A forma projetada de procedimento para as tarefas de manutenção começarem a ser postas em prática é a remoção das placas constituintes do chão do avião sendo que cada placa que se retira repõe-se com uma placa de contraplacado sendo, portanto, substituído o chão normal do avião por contraplacado. A metodologia utilizada de colocação e distribuição das placas obedece a um critério de cores e numeração. Assim, o critério inicialmente projetado permitia um melhor acompanhamento e arrumação das placas quando estas não estão a ser utilizadas. Por sua vez quer o jogo de cores, como observado na Figura 5, quer a numeração das placas, observada na Figura 6, também permitem manter sempre a sequência das placas quando estas são utilizadas de novo. O jogo de cores serve ainda para os técnicos saberem onde se situar dentro do avião quando das tarefas de manutenção.

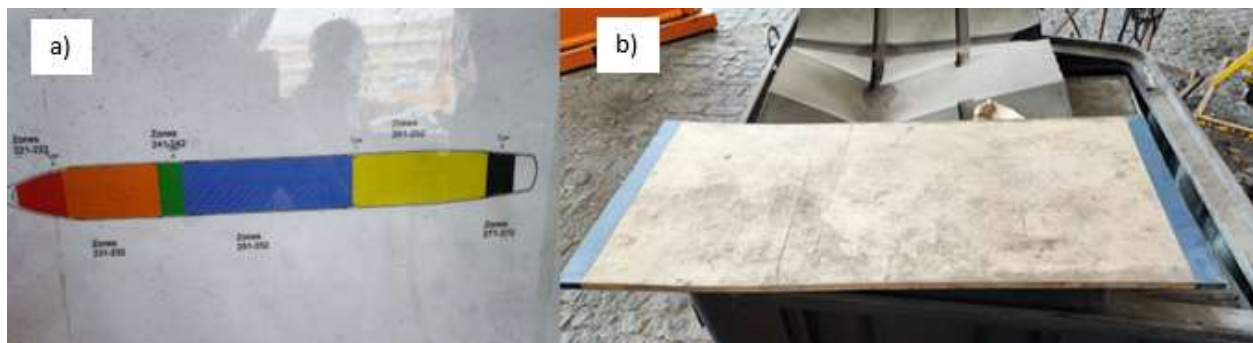


Figura 5 - Jogo de cores de colocação das placas de contraplacado. a) Disposição das placas dentro do avião. b) Placa de contraplacado.



Figura 6 - Placas usadas atualmente com a respectiva numeração.

Presentemente as placas utilizadas são constituídas por contraplacado com 15 mm de espessura de formas e dimensões diversas, como é possível observar na Figura 7 e na Figura 8, respetivamente. As dimensões variam consoante o local onde são colocadas dentro do avião pois, embora as calhas constituintes do chão sejam paralelas ao longo do avião, estas afunilam próximo das extremidades do mesmo.



Figura 7 - Placas usadas atualmente com diversas formas.



Figura 8 - Placas usadas atualmente com diversos tamanhos.

3.2. Limitações do procedimento projetado

Com esta metodologia da substituição do chão do avião por placas de contraplacado resulta que, quando se quer fazer uma tarefa de manutenção na zona abaixo do chão, tenha de retirar-se uma placa, realizar-se a tarefa e voltar a colocar a placa no mesmo local de onde foi retirada. Esta situação traduz-se no decréscimo da rentabilização do tempo destinado à tarefa.

Neste contexto é necessário um número significativo de placas de contraplacado que levam, também, ao gasto de um tempo significativo na organização/arrumação das mesmas. Por vezes, este tempo, dado que é acrescido ao tempo da tarefa de manutenção, prolonga o tempo destinado aos trabalhos e poderá minimizar a importância da arrumação das placas, como é possível observar na Figura 9.



Figura 9 - Disposição das placas de contraplacado.

A não arrumação das placas pode inviabilizar que a sua colocação seja rápida e eficiente, por exemplo na situação de necessidade de as colocar num avião recém-chegado. Esta situação aumenta a probabilidade de uma incorreta aplicação das placas na situação seguinte. Esta incorreta colocação poderá pôr em risco a segurança no desenrolar das tarefas de manutenção.

3.3. Procedimento praticado

Verifica-se que as placas de contraplacado que substituem as placas do chão não são todas colocadas no chão do avião nem respeitam os critérios de tamanhos e cores na sequência prevista. O facto de não serem todas colocadas cria um problema de segurança e eficácia pois apenas com as placas todas colocadas é que estas se bloqueiam entre si, não permitindo que as mesmas saiam do lugar.

Apesar de, longitudinalmente, o espaço entre duas calhas ser totalmente preenchido não invalida que, transversalmente, não se preencha totalmente o espaço. Acontece que, por economia de tempo, nem todas as vias longitudinais são preenchidas, como observado na Figura 10, fazendo com que a travessia transversal no avião se faça sem as devidas condições de segurança e eficácia inicialmente previstas. Assim sendo, a deslocação dentro do avião faz-se somente com o suporte de duas vias longitudinais junto às paredes do avião. Estas vias longitudinais acabam por proporcionar uma deslocação dos técnicos em movimento circular ou com cruzamentos permanentes entre si. Na deslocação circular existe o risco de percorrer uma distância relativamente grande para uma necessidade de deslocação pequena, tornando o processo ineficaz. Não optando pela deslocação circular, os técnicos terão de se cruzar entre si, levando a que duas pessoas se cruzem numa placa com 50 cm de largura. Acresce o facto de ser comum que os técnicos tenham de se deslocar com materiais/equipamentos para a realização das tarefas de manutenção, tornando o processo pouco seguro.

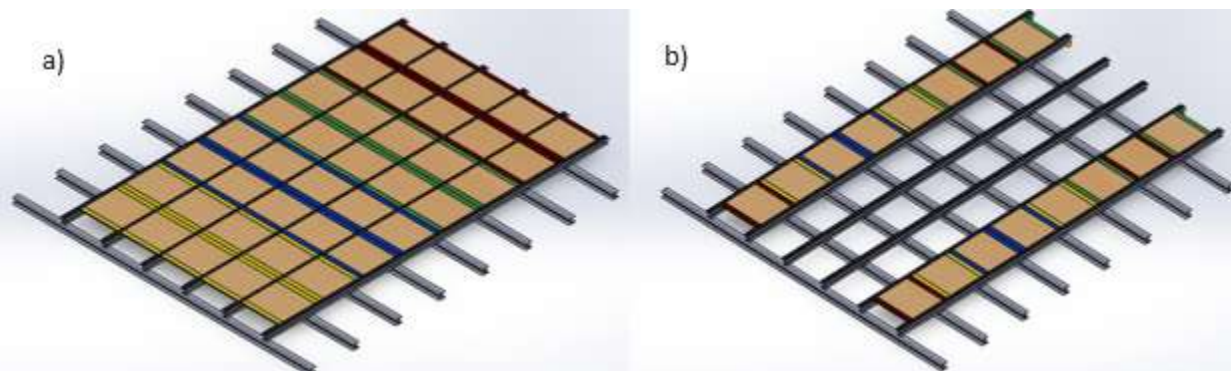


Figura 10 - Disposição das placas de contraplacado durante as tarefas de manutenção. a) Procedimento projetado. b) Procedimento praticado.

Devido à velocidade com que a indústria trabalha e devido aos prazos que são necessários cumprir, observa-se que a substituição das placas de chão pelas placas de contraplacado não acontece da forma que foi projetada. Os procedimentos praticados inviabilizam uma resposta rápida constituindo-se como uma barreira à velocidade nos cumprimentos das ordens de trabalho.

4. Projeto

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do projeto da plataforma. Inicialmente será explicado quais são as condições do projeto que se vai realizar dando, portanto, a conhecer ao leitor as escolhas feitas para os estudos que serão realizados. O capítulo divide-se em dois subcapítulos sendo estes as condições de projeto e o desenvolvimento da plataforma. No subcapítulo do desenvolvimento da plataforma serão apresentados os estudos realizados, com os respetivos resultados e o pensamento que levou à constituição final da plataforma.

4.1. Condições de projeto

Neste subcapítulo fala-se das condições em que foram realizados os estudos, em que software, com que tipo de malha, quais as cargas aplicadas e os seus apoios. Explica também o pensamento que leva à escolha das cargas críticas para o projeto.

4.1.1. Software utilizado

O software escolhido para se realizarem os estudos estáticos neste projeto foi o *SolidWorks*. Foi o software escolhido pois, sendo um programa de método de elementos finitos, permite obter resultados para estruturas mais complexas onde é difícil a realização dos cálculos analíticos. É um programa bastante versátil que permite a modelação de peças que, por sua vez, se podem juntar criando montagens. Podem ser realizados estudos quer em peças, quer em montagens, com diferentes geometrias, tamanhos e materiais. Gera três tipos de arquivos interligados: a peça, a montagem e o desenho sendo que, quando se faz uma alteração num destes arquivos, altera automaticamente os outros.

4.1.2. Malha utilizada

Existem diversos tipos de malha que se aplicam em diferentes situações consoante a tipologia da estrutura relativamente à qual queremos fazer os estudos. O *SolidWorks* disponibiliza três tipos de malha diferentes. No projeto da plataforma apenas dois tipos de malha irão ser usados, sendo esses [13]

Malha sólida – A malha sólida é criada para elementos volumosos. O *SolidWorks* cria uma malha com elementos lineares tetraédricos que ocupam o volume total da peça, como se pode

observar na Figura 11. Para se obter uma melhor qualidade nos resultados, o *SolidWorks* permite escolher uma malha sólida de melhor qualidade que, ao invés de serem elementos lineares tetraédricos, estes são parabólicos tetraédricos (quadráticos) o que permite uma melhor resolução para fronteiras curvas. No entanto, quanto maior for a qualidade da malha mais esforço computacional é necessário [13]

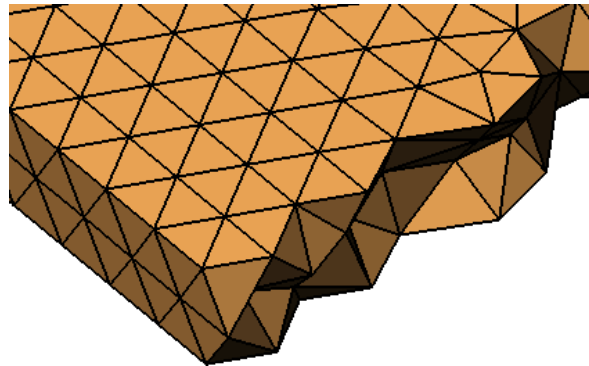


Figura 11 – Aspecto da malha sólida. [13]

Malha de “casca” – A malha de “casca” é criada quando uma das dimensões é significativamente inferior às outras. Esta malha é normalmente criada para chapas metálicas com espessuras uniformes. É criada a malha no meio da espessura da chapa e existe apenas um elemento por espessura como observado na Figura 12. Semelhante à malha sólida, a malha de “casca” é criada, por defeito, como sendo linear triangular. No entanto, para se obter uma melhor qualidade nos resultados, esta malha pode ser alterada para parabólica triangular. Para estudos estruturais cada nó do elemento tem seis graus de liberdade, sendo estes, três de translação e três de rotação [13].

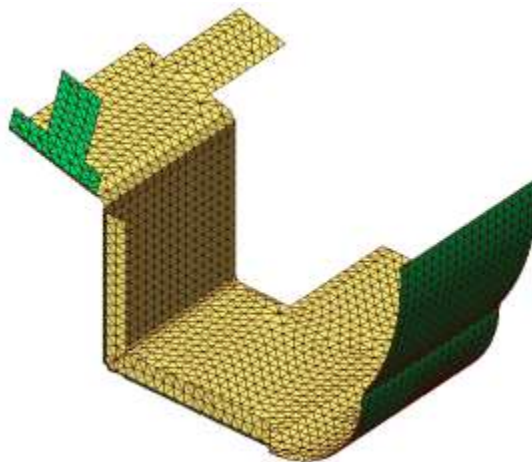


Figura 12 – Aspecto da malha de “casca”. [13]

Malha mista – A malha mista utiliza-se quando existe mais que uma geometria no projeto. Na malha mista o programa reconhece os volumes grandes e as “cascas”, gerando as malhas indicadas para cada tipo. A maioria dos projetos tende a ter uma malha mista [13].

A malha que vai ser utilizada para a realização dos estudos estáticos é uma malha mista composta por malha sólida e malha de “casca”. Nos primeiros estudos não irá ser refinada, pois, apenas servem para testar a viabilidade de um certo componente ou de um certo material. Quando o projeto estiver numa fase mais avançada a malha será refinada nos locais de interesse, isto é, em locais de concentração de tensões e locais com deformadas acentuadas, para se obter os valores mais próximos da realidade.

4.1.3. Apoios

Na realização dos estudos estáticos é necessário definir-se bem os apoios a ser utilizados por forma a que o modelo se aproxime, ao máximo, da realidade. Os primeiros estudos foram realizados com modelos simplificados com o objetivo de se obter a confirmação de que o “corpo da plataforma” resistia às cargas aplicadas. Em primeiro lugar definiu-se o modelo estrutural do problema, como é possível observar na Figura 13, que ajuda a entender como é que os apoios da plataforma se comportam quando existe a aplicação de uma carga. De seguida, verificaram-se quais as reações a que está sujeita a plataforma, como se pode observar no diagrama de corpo livre na Figura 14.

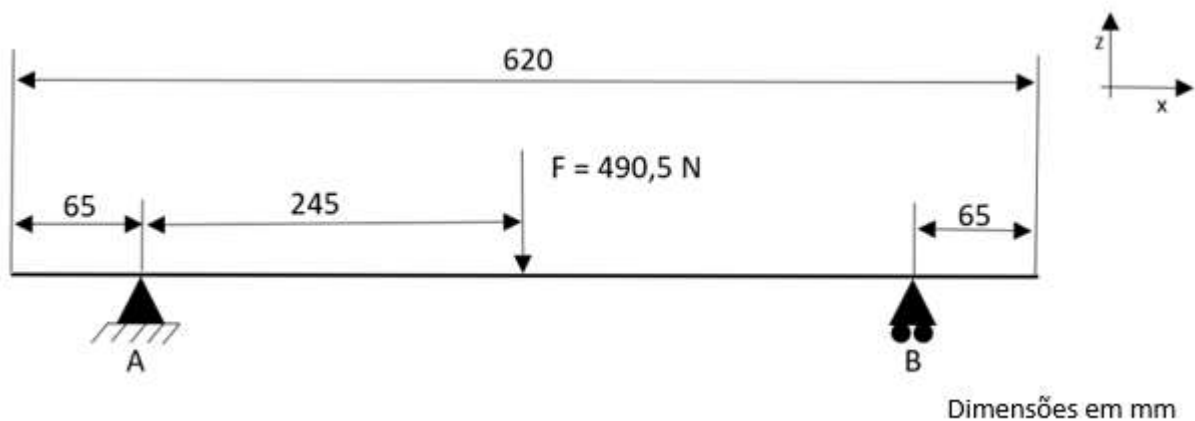


Figura 13 - Modelo estrutural simplificado da plataforma móvel.

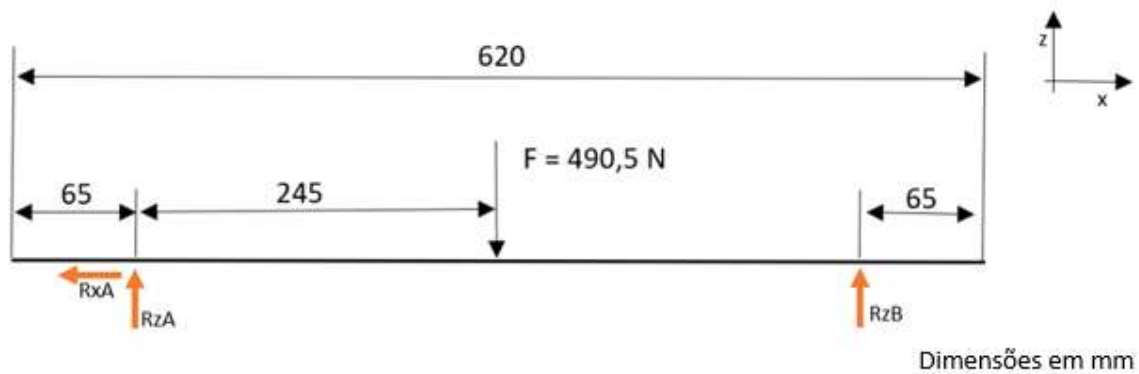


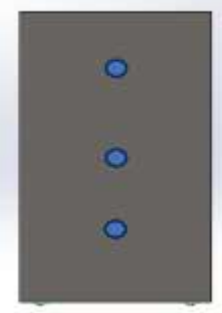
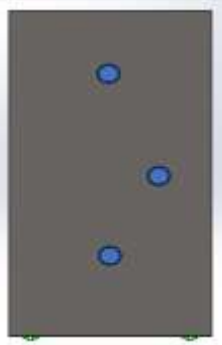
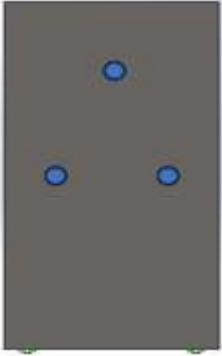
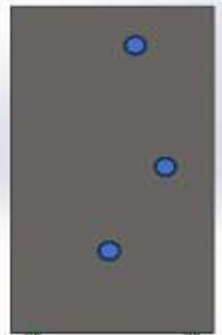
Figura 14 - Diagrama de corpo livre simplificado da plataforma móvel.

4.1.4. Cargas aplicadas

Na realização de um estudo estático as cargas devem ser aplicadas nos pontos que vão gerar o maior esforço na plataforma; esta deve ser submetida ao maior esforço possível. O que gera o maior esforço, maiores tensões e maior deslocamento, é o caso hipotético de uma carga pontual, pois, se a plataforma resistir aos estudos com cargas pontuais, seguramente irá resistir quando a carga for distribuída. De forma a realizarem-se os estudos para o maior esforço possível, as cargas aplicadas foram pontuais. As cargas aplicadas terão uma intensidade de 490,5 N (50 Kg) e serão aplicadas três, com o objetivo de simular o peso criado pelas diversas ferramentas, caixas de ferramentas e suportes que poderão ser colocadas em cima da plataforma. Assumiu-se que o valor do peso das ferramentas, caixas e suportes não excederiam o valor de 50 Kg mesmo quando empilhados. No entanto, os estudos são realizados com três cargas de forma a simular a colocação de vários objetos sobre a plataforma.

Uma das limitações dos estudos estáticos é o da impossibilidade de estudar todos os pontos de esforço a que a plataforma será sujeita. Nesta impossibilidade, o mais adequado é realizar o estudo para a situação mais crítica. De forma a determinar-se qual seria a situação mais crítica realizaram-se quatro estudos com as cargas em posições diferentes, como exposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Determinação da localização das cargas para averiguação de caso crítico.

Localização das cargas	Deformada máxima (mm)	Tensão máxima (MPa)	Observações
	2,147	218,7	Testadas três cargas centradas no comprimento da plataforma
	2,016	197,1	Testadas três cargas sendo duas centradas no comprimento e uma mais próxima dos apoios
	2,210	243,1	Testadas três cargas sendo duas centradas na largura e uma mais próxima da extremidade da plataforma
	2,089	202,6	Testadas três cargas aleatórias

O pensamento subjacente à colocação das cargas nos quatro estudos realizados foi o de gerar o maior esforço na plataforma, daí ter-se começado por colocar as cargas o mais longe dos apoios, no centro da plataforma. Posteriormente colocou-se a hipótese de essa não ser a hipótese que geraria um maior esforço, mas sim a colocação de duas cargas no centro da plataforma com outra perto de umas das extremidades. De forma a serem testadas outras hipóteses, no terceiro estudo descentrou-se uma das cargas do estudo inicial para uma das laterais da plataforma. Por fim testou-se com as três cargas em pontos aleatórios. Na placa modelada para o efeito, a maior tensão e deformada foi sentida no segundo estudo e será, por isso, essa a localização das cargas nos estudos estáticos da plataforma que se está a desenvolver.

4.2. Desenvolvimento da plataforma

Um dos objetivos com o desenvolvimento da plataforma é que esta seja multifuncional. Assim, pode ser usada para transporte de material e para servir como apoio para, simplesmente, pousar alguma ferramenta que esteja a ser utilizada e que não seja possível colocar na placa de contraplacado por falta de espaço. Na tentativa de chegar à melhor resposta, face à oportunidade de melhoria identificada, foram sendo realizadas várias hipóteses aproximando-se cada vez mais do resultado pretendido. O principal objetivo é que a plataforma deslize sobre as calhas sem colocar, nem os técnicos nem os materiais, em risco. Os modelos testados são de uma plataforma que assenta apenas em duas calhas, para se manter fiel ao modelo usado atualmente.

Considerações iniciais:

- Todos os estudos serão realizados com as cargas e apoios previamente apresentados;
- Os estudos terão em conta um coeficiente de segurança que será dependente do material a testar;
- Os estudos do “corpo da plataforma” foram realizados com uma plataforma com os apoios simplificados para verificar se o material resistia sem rutura;
- O critério de escolha do material depende do peso, dos valores da deformada, tensão máxima von Mises obtida e coeficiente de segurança assegurado.
- A tensão observada no programa é a tensão de von Mises máxima sentida na plataforma. Quando a tensão de von Mises ultrapassa a tensão de cedência o material deforma plasticamente, logo, a tensão de von Mises sentida na plataforma não pode ser maior que a tensão de cedência do material.
- Foi definida uma deformada máxima aceitável de 10 mm, pois considerou-se que uma deformada superior a 10 mm dificultaria as tarefas de manutenção.

4.2.1. Corpo da plataforma

1ª Hipótese (Madeira de balsa)

Tendo em conta o material utilizado atualmente nas placas de apoio às tarefas de manutenção, decidiu-se testar uma hipótese onde a madeira fosse o material constituinte da plataforma. A madeira escolhida para o estudo foi a balsa. A madeira de balsa é proveniente de uma árvore denominada pau-de-balsa. É uma madeira bastante usada na indústria devido à sua baixa densidade, no entanto a madeira de balsa industrial pode ter diversas densidades e propriedades mecânicas. As grandes variações na densidade são o principal fator para a mudança das propriedades mecânicas. Estas variações derivam maioritariamente das suas fibras que são longas células prismáticas que atuam como os principais elementos de sustentação da madeira [14]. A madeira de balsa escolhida para a realização dos estudos tem as seguintes propriedades mecânicas:

Tabela 2 – Propriedades mecânicas da madeira de balsa [14].

Material	Densidade (kg/m³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade transversal (MPa)
Madeira de balsa	160	3	20	300

Todas as partes deste trabalho são projetadas tendo em conta um coeficiente de segurança. Esse coeficiente de segurança é dependente do material que está a ser testado. Sendo que as primeiras hipóteses testadas foram com madeira, adotou-se um coeficiente de segurança de 2 pois a carga aplicada na plataforma é gradual e a rutura da plataforma não põe em risco a integridade física dos técnicos. Nos seguintes estudos estáticos analisar-se-á qual a espessura necessária para que o “corpo da plataforma” seja projetado obedecendo ao coeficiente de segurança de 2.

O “corpo da plataforma” é a estrutura principal da plataforma, onde as ferramentas, caixas de ferramentas e suportes vão assentar. Modelou-se um corpo de plataforma em madeira de balsa, com 620 x 1000 mm tendo sido os apoios distanciados de 500 mm que corresponde à distância entre as calhas onde a plataforma irá assentar.

No primeiro estudo a espessura do “corpo da plataforma” foi de 12 mm tendo sido a tensão máxima observada na placa de 6,26 MPa, como observado na Tabela 3. Sendo que a tensão de cedência da madeira de balsa corresponde a 20 MPa, o corpo da plataforma inicialmente projetado está sobredimensionado, pois o coeficiente de segurança para o qual se está a projetar é de 2 e nesta primeira hipótese obteve-se um coeficiente de segurança de 3,19. Dado as condições de projeto estarem definidas, o que se alterou para se obter um coeficiente de segurança mais próximo do espectável foi a espessura do “corpo da plataforma”.

No segundo estudo, já com uma espessura de 10 mm a tensão máxima observada foi de 7,70 MPa, estando ainda o valor do coeficiente de segurança elevado para o proposto. O processo replicou-se até o valor do coeficiente de segurança estar o mais próximo do desejável, como é possível observar na Tabela 3. Embora o coeficiente de segurança não seja exatamente 2 considerou-se que a espessura de 9 mm era o mais indicado para finalizar os estudos no corpo da plataforma em madeira de balsa. A tensão máxima sentida no “corpo de plataforma” de 9 mm foi de 9,45 MPa, como observável na Figura 15.

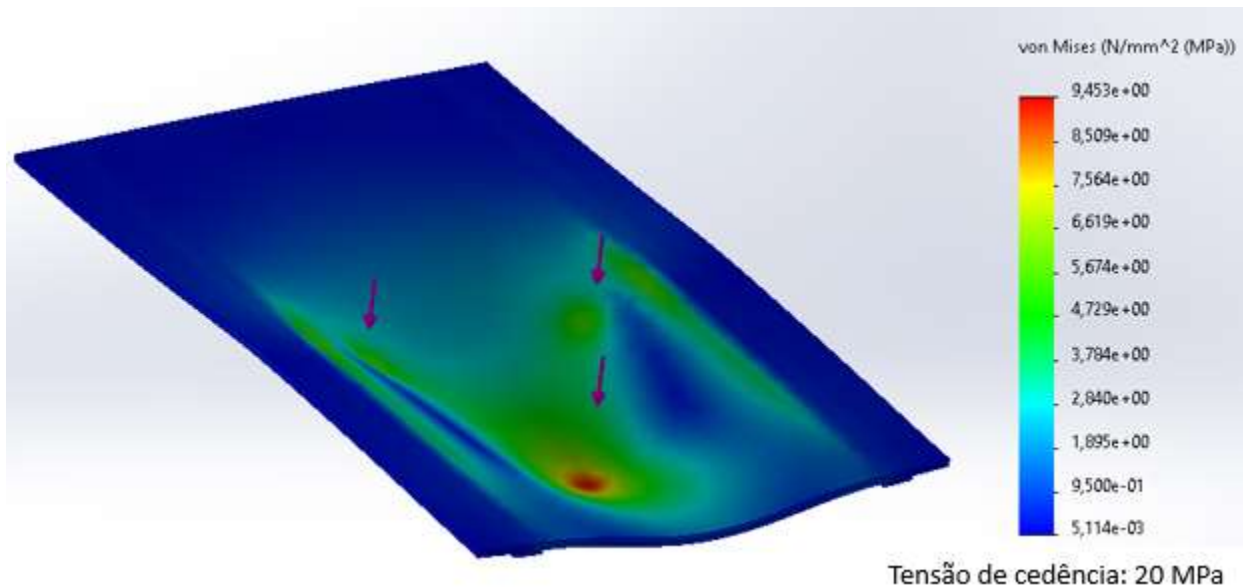


Figura 15 - Mapa de distribuição de tensões de von Mises obtido com a aplicação de três cargas de 50 kg num “corpo de Plataforma” de 9 mm de espessura, em madeira de balsa.

Tabela 3 - Comparação de resultados dos estudos realizados para diferentes espessuras em madeira de balsa.

Madeira de balsa	Peso (Kg)	Tensão máxima von Mises (MPa)	Coefficiente de segurança calculado	Deformada máxima (mm)
12 mm	1,25	6,26	3,19	2,21
10 mm	1,05	7,70	2,60	3,65
8 mm	0,85	11,87	1,68	6,77
9 mm	0,95	9,45	2,12	4,89

Nos primeiros estudos de escolha do material, concluiu-se que a madeira de balsa é realmente um material a ter em consideração para o “corpo da plataforma”, pela sua relação resistência/peso. No entanto, tal como qualquer material, revela problemas associados tais como a facilidade de lascas e a fraca resistência ao impacto.

2ª Hipótese (Aço AISI 1020)

Embora para as cargas propostas o “corpo da plataforma” em madeira de balsa esteja bem dimensionado, é necessário experimentar outras hipóteses de material, de forma a tentar obter a plataforma mais otimizada e adaptada à situação. O material testado nesta segunda hipótese foi o aço pois, a plataforma ao ser simplesmente apoiada em duas calhas, poderia trazer uma boa relação resistência/peso. O aço é um material bastante usado em engenharia devido à sua elevada resistência mecânica, durabilidade e ductilidade. O aço usado nestes estudos foi o aço AISI 1020, com as seguintes propriedades mecânicas:

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço AISI 1020 [15]

Material	Densidade (kg/m ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de corte (GPa)
Aço AISI 1020	7900	200	420	77

Normalmente, o coeficiente de segurança para uma peça feita em aço varia entre 1,5 e 2,5, dependendo do tipo de carga aplicada e do risco para quem a está a utilizar. Sendo que a plataforma projetada será para cargas graduais e não de impacto, e que em caso de rutura não põe os técnicos

em risco adotou-se um coeficiente de segurança de 1,5 para os estudos do “corpo da plataforma” em aço.

No primeiro estudo o corpo da plataforma foi projetado como tendo 3 mm. As condições de teste permaneceram as mesmas relativamente às anteriormente apresentadas e a tensão máxima observada foi de 58,96 MPa, como é possível observar na Tabela 5. Tendo o aço uma tensão de cedência elevada e sendo as cargas relativamente leves obteve-se, neste primeiro estudo, um coeficiente de segurança de 5,96. De forma a combater o elevado coeficiente de segurança foi-se testando o “corpo da plataforma” com várias espessuras até se aproximar do coeficiente de segurança pretendido. Quando se testou uma espessura de 1 mm, o coeficiente de segurança ainda permanecia elevado levando à conclusão de que a elevada ductilidade do aço para cargas baixas resulta numa grande deformação para uma tensão longe da tensão de cedência. A tensão de von Mises máxima observada num “corpo de plataforma” em aço com 1 mm de espessura foi de 87 MPa, como observável na Figura 16.

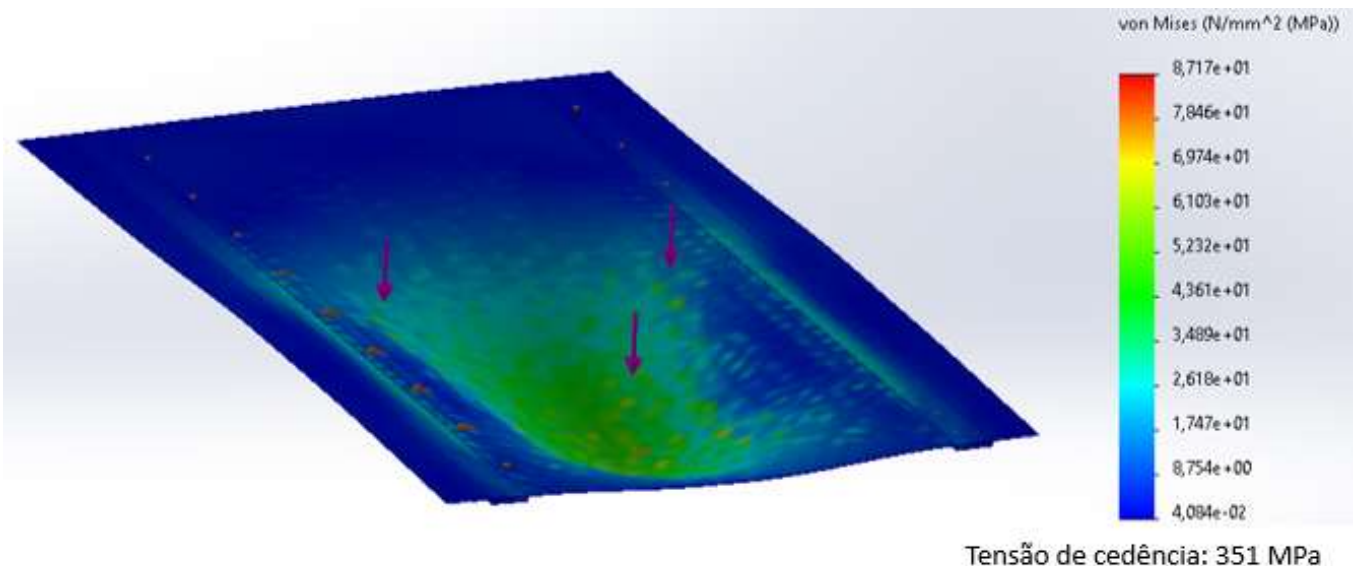


Figura 16 - Mapa de distribuição de tensões de von Mises obtido com a aplicação de três cargas de 50 kg num “corpo de Plataforma” de 1 mm de espessura, em aço AISI 1020.

Tabela 5 - Comparação de resultados dos estudos realizados para diferentes espessuras em aço AISI 1020.

Aço AISI 1020	Peso (Kg)	Tensão máxima von Mises (MPa)	Coefficiente de segurança	Deformada máxima (mm)
3 mm	14,69	58,96	5,96	1,31
2 mm	9,79	74,90	4,69	2,56
1 mm	4,89	87,17	4,03	3,15

Depois de realizados três estudos em aço concluiu-se que este não seria o material indicado, pois a sua elevada resistência mecânica leva a que o “corpo da plataforma” tenha de ser demasiado “fino”, o que dificulta o transporte da plataforma. Mesmo sendo uma espessura muito pequena o peso continua a ser bastante elevado para o transporte da plataforma.

3ª Hipótese (Liga de Alumínio Alloy 2018)

Devido ao problema do peso encontrado na segunda hipótese decidiu-se alterar o material para um material que não compromettesse em termos de resistência mecânica, mas que fosse substancialmente mais leve. O material escolhido para o efeito foi uma liga de alumínio alloy 2018, material bastante usado na indústria aeronáutica pela sua relação resistência/peso, durabilidade e ductilidade. A presença do alumínio na indústria é bastante visível, por exemplo, a parte estrutural do airbus A320 e as calhas onde a plataforma irá assentar são constituídas por alumínio. A liga de alumínio escolhida para se realizarem os estudos foi a liga de alumínio alloy 2018, que apresenta as seguintes propriedades mecânicas:

Tabela 6 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio alloy 2018 [16]

Material	Densidade (kg/m ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de rotura (Mpa)	Módulo de corte (GPa)
Liga de alumínio Alloy 2018	2800	74	314	27

No primeiro estudo com a liga de alumínio, modelou-se o “corpo da plataforma” com 6 mm, um pouco mais espesso que no primeiro estudo com aço devido à sua resistência e densidade inferior. Na modelação com 6 mm e com as condições de teste iguais, a tensão máxima observada foi de 20,87 MPa, como observado na Tabela 7. Como aconteceu anteriormente, o primeiro estudo

encontra-se longe da espessura mínima que o “corpo da plataforma” tem de ter para se aproximar do coeficiente de segurança definido para a liga de alumínio. O coeficiente de segurança definido para uma peça numa liga de alumínio aproxima-se dos valores dos coeficientes de segurança para uma peça de aço, logo adotou-se o mesmo coeficiente de segurança de 1,5. No total foram realizados três estudos onde se foi variando a espessura, com o objetivo de otimizar o peso. Existiu sempre com o cuidado de a tensão máxima de von Mises sentida não ultrapassar a tensão de cedência do material tendo em conta o coeficiente de segurança de 1,5. A espessura do estudo final foi de 2 mm onde a tensão máxima observada foi de 74,03 MPa, como é possível verificar na Figura 17.

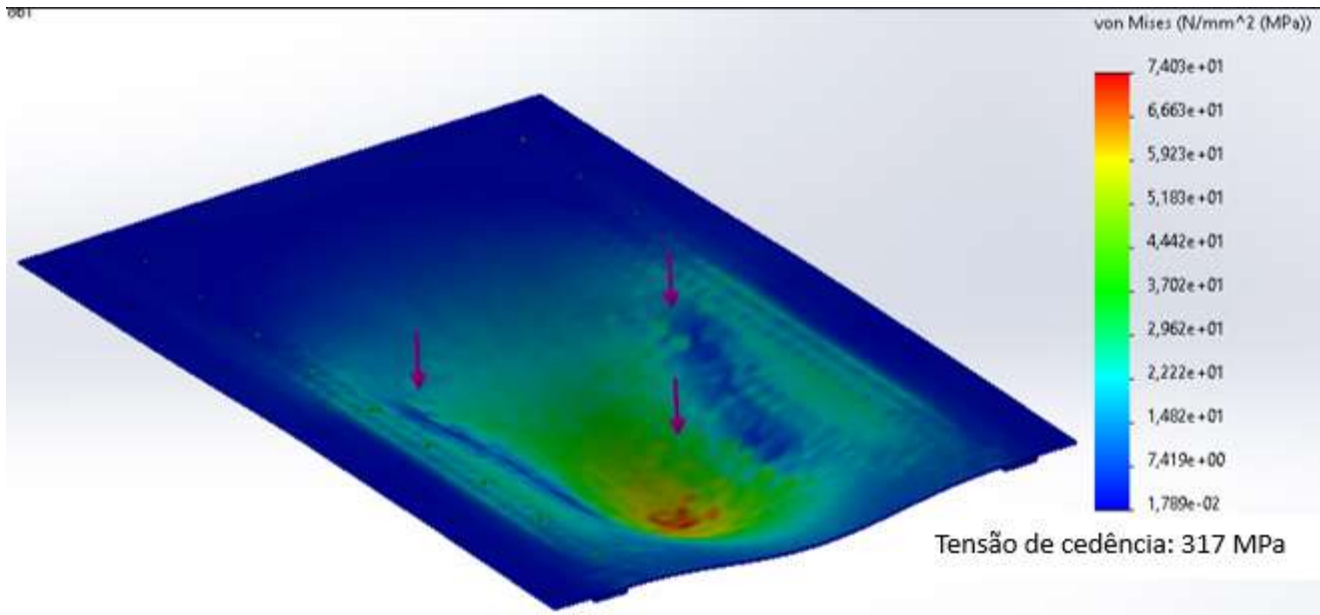


Figura 17 - Mapa de distribuição de tensões de von Mises obtido com a aplicação de três cargas de 50 kg num “corpo de Plataforma” de 2 mm de espessura, numa liga de alumínio alloy 2018.

Tabela 7 - Comparação de resultados dos estudos realizados para diferentes espessuras numa liga de alumínio alloy 2018.

Liga de alumínio Alloy 2018	Peso (Kg)	Tensão máxima von Mises (MPa)	Coeficiente de segurança	Deformada máxima (mm)
6 mm	10,41	20,87	15,19	0,63
4 mm	6,94	41,30	7,70	1,76
2 mm	3,47	74,03	4,28	6,55

Após realizados três estudos chegou-se à conclusão de que a liga de alumínio teria o mesmo problema do aço, ter uma resistência demasiado elevada para as cargas impostas. O “corpo da plataforma” iria ter de ser demasiado “fino” o que não seria confortável para transportar. Também se observou que ao ter uma grande ductilidade a deformada seria demasiado elevada.

4ª Hipótese (Madeira de balsa- Liga de alumínio alloy 2018)

No projeto de um componente é necessário tentar encontrar o melhor material possível, para se tirar o melhor partido para a função que esta vai realizar. Por vezes “o melhor material” não é apenas um, mas sim a junção de dois ou mais que leva a que se obtenham as melhores características de cada material. Nesta quarta hipótese decidiu-se juntar a madeira de balsa, pela sua boa resistência e densidade baixa, com a liga de alumínio, por ter uma excelente resistência. Optou-se pela liga de alumínio em detrimento do aço por este ser mais leve. A junção destes dois materiais irá também ser vantajosa na medida em que a liga de alumínio ajudará com a resistência ao impacto, característica que falha na madeira de balsa.

O estudo realizado teve as mesmas condições dos anteriores, 50 kg aplicados em três zonas distintas e os apoios simplificados. Juntou-se a placa de madeira de balsa de 9 mm e a placa de liga de alumínio de 2 mm. A tensão máxima observada no “corpo da plataforma” constituído por estes dois materiais foi de 20,18 MPa, como é possível observar na Figura 18.

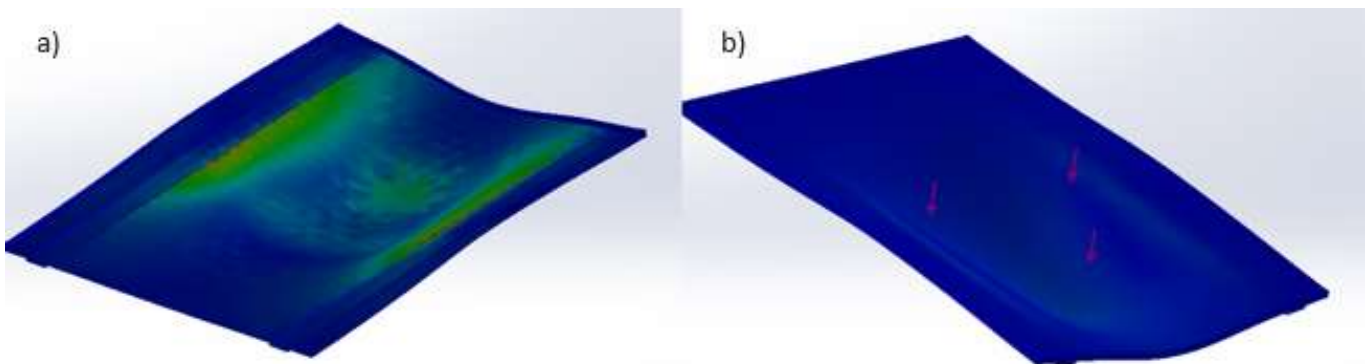


Figura 18 - Mapa de distribuição de tensões de von Mises obtido com a aplicação de três cargas de 50 kg num “corpo de Plataforma” de 2 mm de espessura, numa liga de alumínio alloy 2018 e 9 mm de espessura em madeira de balsa. a) vista inferior. b) vista superior.

Quando o “corpo da plataforma” foi modelado apenas com um material constituinte, as tensões observadas na parte superior e inferior eram iguais, o que não acontece quando se juntam dois materiais. Quando é apenas um material constituinte a tensão de compressão e a tensão de tração sentidas na parte de cima da linha neutra e na parte de baixo da linha neutra são iguais.

Quando se juntam dois materiais com características diferentes e que estão fisicamente ligados, estes comportam-se de forma diferente. Dado a liga de alumínio alloy 2018 ter um módulo de elasticidade superior ao da madeira de balsa existe uma maior concentração de tensões na liga de alumínio.

A tensão máxima observada não ultrapassa a tensão de rotura de nenhum dos materiais constituintes do corpo da plataforma e a deformada máxima atinge um valor de 0,94 mm.

Depois de realizado o estudo para a junção de materiais observou-se que o corpo da plataforma pesava 4,36 Kg e, estando o corpo da plataforma modelado com um coeficiente de segurança elevado, decidiu-se otimizar a placa de liga de alumínio retirando-se um pouco de material à parte da liga de alumínio. Deste modo, a plataforma ficará mais leve e continuará a ter a liga de alumínio como base.

Neste segundo estudo mantiveram-se todas as condições de teste com exceção da placa de liga de alumínio à qual se retirou material e diminuiu-se a placa de madeira de balsa para 8 mm. Observou-se uma diminuição da tensão máxima, devido ao facto de que ao retirar-se material o local onde se observam as tensões máximas alterou-se. Verificou-se ainda um aumento do valor máximo da deformada. A tensão máxima observada foi de 19,41 MPa, como é possível observar na Figura 19.

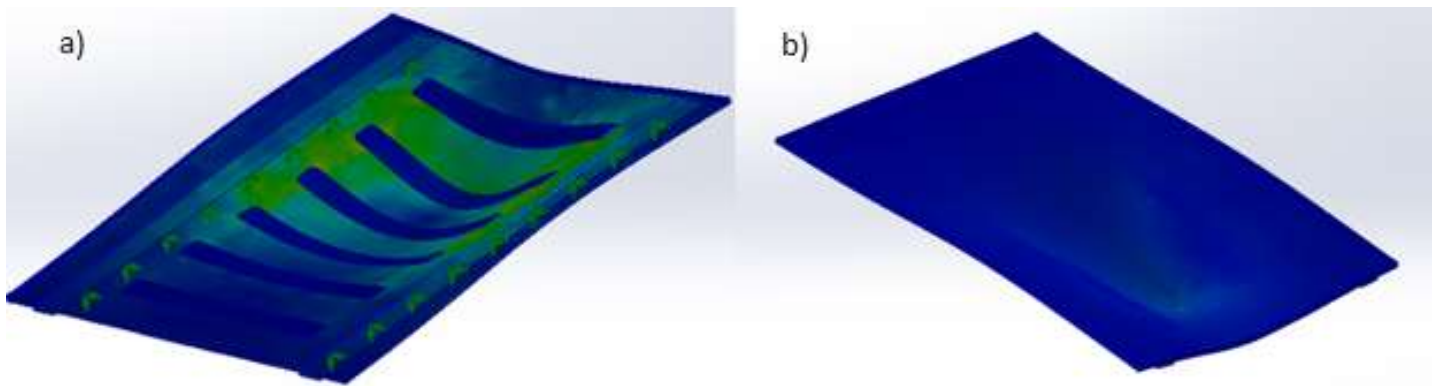


Figura 19 - Mapa de distribuição de tensões de von Mises obtido com a aplicação de três cargas de 50 kg num “corpo de Plataforma” otimizado de 2 mm de espessura, numa liga de alumínio alloy 2018 e 8 mm de espessura em madeira de balsa. a) vista inferior. b) vista superior.

Tabela 8 - Valores da otimização do "corpo de plataforma" Madeira de balsa – Liga de Alumínio alloy 2018.

Material	Peso sem otimização (Kg)	Peso com otimização (Kg)	Decréscimo de peso (Kg)	Decréscimo de peso (%)
Madeira de balsa - Liga de Alumínio	4,36	3,68	0,68	15,7

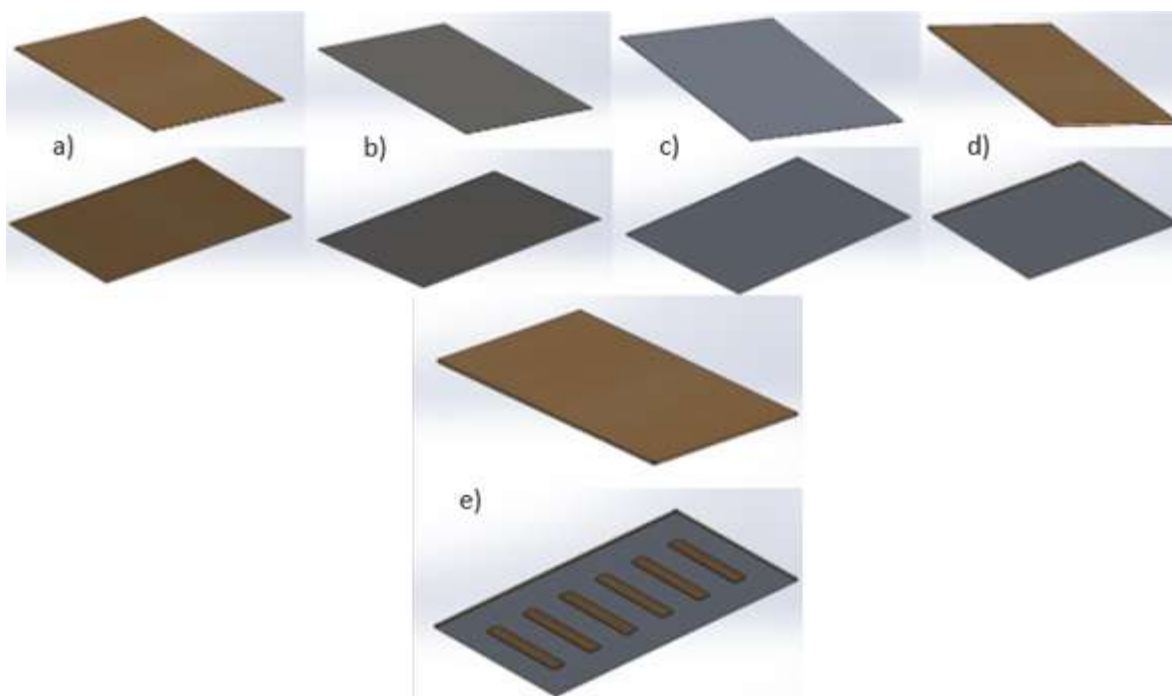


Figura 20 - Processo evolutivo do corpo da plataforma - a) Corpo da plataforma em madeira de balsa, b) Corpo da plataforma em aço, c) Corpo da plataforma em liga de alumínio, d) Corpo da plataforma em madeira de balsa e liga de alumínio, e) Corpo da plataforma em madeira de Balsa e liga de alumínio otimizado (escolha final).

Após o processo evolutivo da escolha do material, como é possível observar na Figura 20, e da espessura do mesmo para a constituição do “corpo da plataforma” decidiu avançar-se com a conjugação dos materiais liga de alumínio alloy 2018 e madeira de balsa nas espessuras 2 mm e 8 mm, respetivamente. Esta escolha foi baseada nas características de cada material e naquilo que de melhor podem trazer à plataforma. A madeira de balsa, ao ter uma densidade baixa, adicionará volume à plataforma enquanto a liga de alumínio acrescenta resistência ao “corpo da plataforma”.

4.2.2. Apoios da plataforma

Uma das oportunidades de melhoria observadas foi a de se conseguir mover as plataformas nas calhas ao invés de estas serem estáticas. Esta melhoria permitirá que não seja necessário colocar placas de contraplacado em todo o comprimento do avião, mas sim algumas plataformas móveis que irão mover-se ao longo do avião. Depois de projetado o “corpo da plataforma” projetou-se a forma como a mesma irá movimentar-se sobre as calhas do avião. O movimento da plataforma nas calhas irá basear-se num sistema de rodas que estarão aparafusadas ao “corpo da plataforma” já projetado.

As rodas escolhidas para o projeto têm de cumprir certos requisitos, tais como, ter as dimensões necessárias para ficarem inteiramente sobre as calhas, ser de um material que não danifique as calhas e aguentarem uma carga axial suficiente que não comprometa o bom funcionamento da plataforma.

As dimensões, quer das calhas, quer da distância que separa o “corpo da plataforma” das calhas, são bastante pequenas, o que dificultou a procura de rodas que cumprissem os requisitos. A largura onde as rodas irão assentar é de 24,5 mm e a altura, de forma à plataforma ficar o mais próximo da calha, é de 10 mm, como é possível observar na Figura 21.

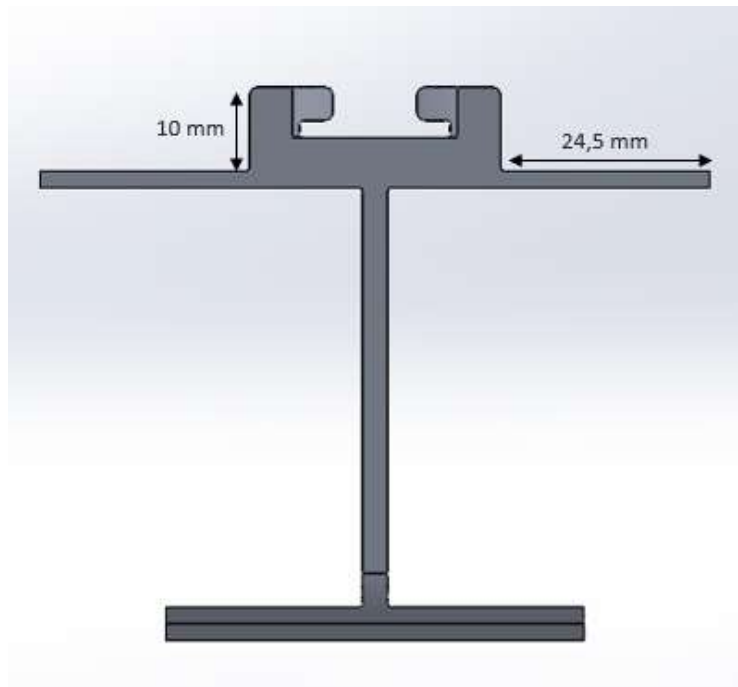


Figura 21 – Dimensões da calha no local onde apoiam as rodas.

Foram escolhidas rodas de borracha vulcanizada onde a parte exterior é de borracha natural vulcanizada anti traços e o centro da roda é feito de tecnopolímero à base de poliamida (PA), com um suporte de roda fixo em chapa de aço. É uma roda com excelente resistência ao rolamento e elasticidade [17] É, também, uma roda indicada para uso em ambientes húmidos e na presença de ambientes químicos médio-agressivos. A roda descrita provém de um catálogo da Elesa, uma empresa fabricante de peças para maquinaria. A descrição de estrutura da roda é RE.C7-050-PBL, sendo assim que é identificada a roda, como é possível verificar na Figura 22. As dimensões da roda podem ser observadas na Figura 23.

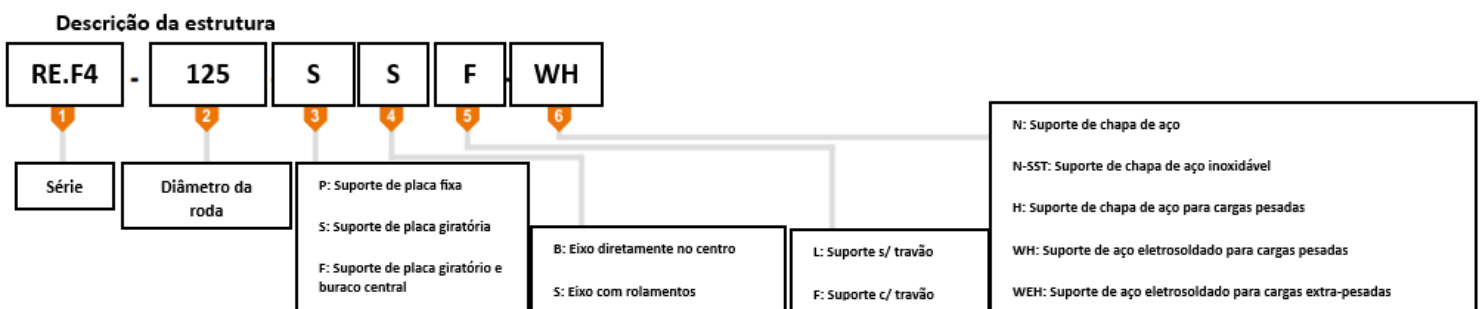


Figura 22 - Descrição da estrutura da roda segundo a empresa Elesa. Adaptado de [17]

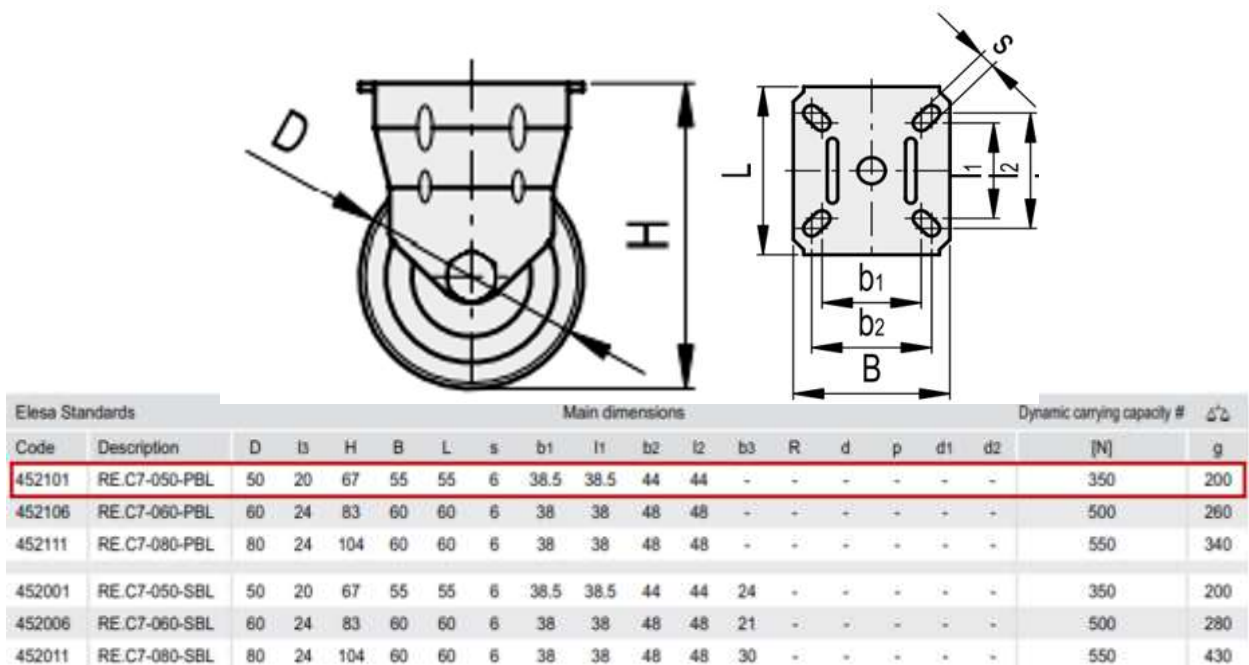


Figura 23 - Dimensões da roda RE.C7-050-PBL. Adaptado de [17]

No seguimento da escolha da roda que melhor servia as condições do projeto, procedeu-se à sua modelação no *SolidWorks*, como é possível observar na Figura 24.

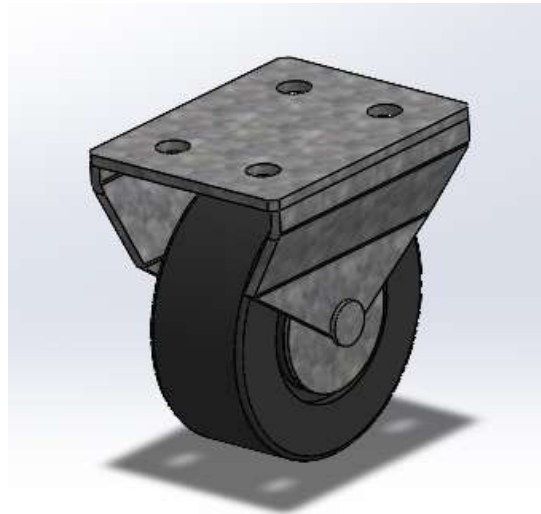


Figura 24 - Roda RE.C7-050-PBL modelada no programa *Solidworks*.

Tabela 9 - Propriedades mecânicas de Poliamida com reforço de fibra de vidro [18]

Material	Densidade (kg/m ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de corte (MPa)
Poliamida com reforço de fibra de vidro	1140	6,5	140	80

Tabela 10 - Propriedades mecânicas do aço AISI 1020.

Material	Densidade (kg/m ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de corte (GPa)
Aço AISI 1020	7900	200	420	77

A ligação das rodas ao “corpo da plataforma” é feita através de parafusos. Assim, depois de modelada a roda, escolheram-se os parafusos. Os parafusos têm de ser completamente roscados, ter um diâmetro de 6 mm e um comprimento mínimo de 14 mm. Optou-se por parafusos de um catálogo da index, como é possível verificar na Figura 25, empresa especializada em fabricar e fornecer sistemas de fixação. O parafuso escolhido é feito de aço AISI 1020 e tem uma tensão de cedência de 351 MPa.

Código	Medida	€/100	Caixa Profissional	Masterbox	EAN	Info. técnica
D93306016	M6 x 16	8,237	250	6,000	8423533720191	



L - Longitude	16	k - Espessura cabeça	4
M° - M	M6	SW - Chave para instalação	10

Figura 25 - Descrição dos parafusos que fixam as rodas ao "corpo da plataforma".

Considerações iniciais:

- Os fatores de decisão do número de rodas necessário são:

- A tensão de von Mises máxima observada na plataforma não pode ultrapassar a tensão de cedência dos materiais.

- Foi definida uma deformada máxima aceitável de 10 mm, considerando-se que uma deformada superior a 10 mm dificultaria as tarefas de manutenção.

- Foi definido um coeficiente de segurança para os parafusos de 2. (Nota: O programa calcula o coeficiente de segurança a que os parafusos estão sujeitos segundo a equação apresentada abaixo e compara com o coeficiente de segurança definido. Se o coeficiente de segurança for superior ao definido, os parafusos estão “OK” se for inferior, os parafusos “Precisam de atenção”.)

- Cada roda tem definido um valor máximo de força que suporta e esse valor não pode ser excedido. (Cada roda suporta uma força máxima entre 350-550 N, segundo o catálogo. Com uma força

aplicada de $3 \times 490,5 = 1471,5$ N o número mínimo de rodas será de 3 ($3 \times 550 = 1650$ N). Dado que 3 rodas não criam a estabilidade necessária na plataforma, o número mínimo são 4 rodas.)

- As calhas onde se vão realizar os estudos estáticos do “corpo da plataforma” com rodas são simplificadas para não existir tanto esforço computacional em cada estudo.

- Os apoios, para os estudos com rodas, já são os apoios reais e não simplificados. As calhas estão encastradas na parte inferior e as rodas estão simplesmente apoiadas nas calhas.

Cálculo do coeficiente de segurança dos parafusos:

$$Tensão\ axial\ (R_a) = \frac{CS * F}{(A_t * S)}$$

CS – Coeficiente de segurança do parafuso (incógnita)

F – Força axial resultante no parafuso

At – Área tensionada

S – Tensão de cedência do parafuso

$$Tensão\ do\ momento\ fletor\ (R_b) = \frac{CS * D * M}{(2 * S * I)}$$

CS – Coeficiente de segurança do parafuso (incógnita)

D – Diâmetro da rosca

M – Momento fletor resultante no parafuso

S – Tensão de cedência do parafuso

I - $0,25 * \pi * r^4$ (momento de inércia do círculo)

$$\text{Tensão de corte } (R_s) = \frac{CS * V}{(0,5 * A_t * S)}$$

CS – Coeficiente de segurança do parafuso (incógnita)

V – Força de corte resultante no parafuso

A_t – Área tensionada

S – Tensão de cedência do parafuso

Combinando:

$$(R_a + R_b)^2 + R_s^3 \leq 1$$

A solução da inequação de terceiro grau é o valor do coeficiente de segurança do parafuso. Apenas as raízes positivas são consideradas como sendo o CS.

1ª Hipótese (8 rodas)

No primeiro estudo foram aparafusadas oito rodas ao “corpo da plataforma”, como é possível observar na Figura 27. O primeiro estudo foi realizado com oito rodas porque, tendo sempre de existir uma roda em cada vértice para ter estabilidade e dado os estudos estáticos serem realizados com duas cargas no centro da plataforma, decidiu-se colocar quatro rodas no centro para verificar se estas resistiam. O modelo estudado tem quatro rodas sobre cada calha sendo que duas se encontram no interior da calha e duas no exterior, contribuindo assim para o bloqueio transversal da plataforma sobre a mesma, como se pode observar na Figura 26. Após a colocação das rodas realizou-se o estudo estático com as mesmas condições de projeto com que se haviam realizado os estudos para a modelação do “corpo da plataforma”.

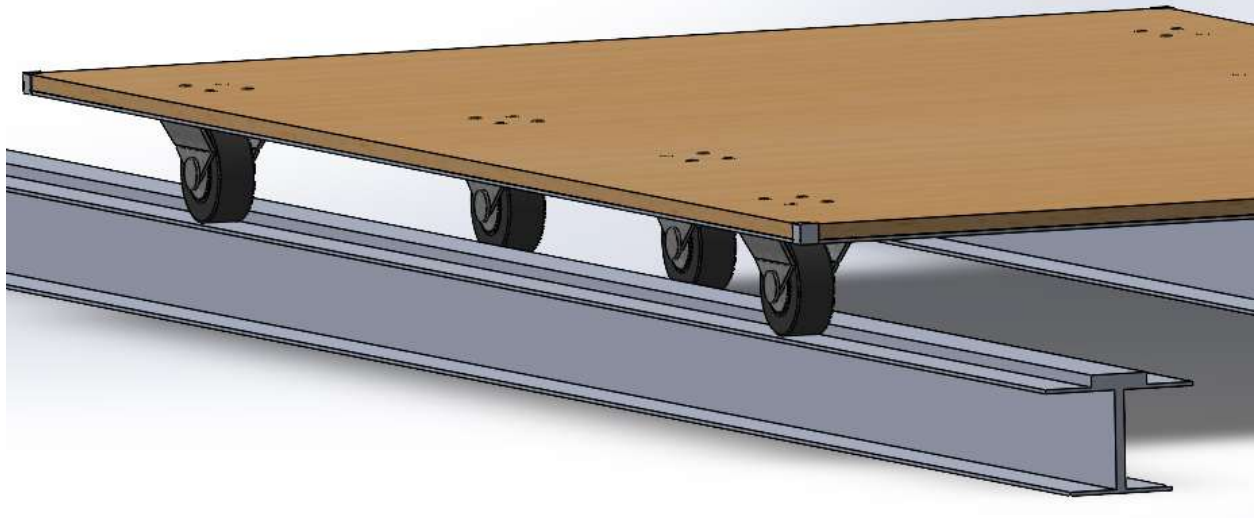


Figura 26 – Disposição das rodas no modelo com 8 rodas.

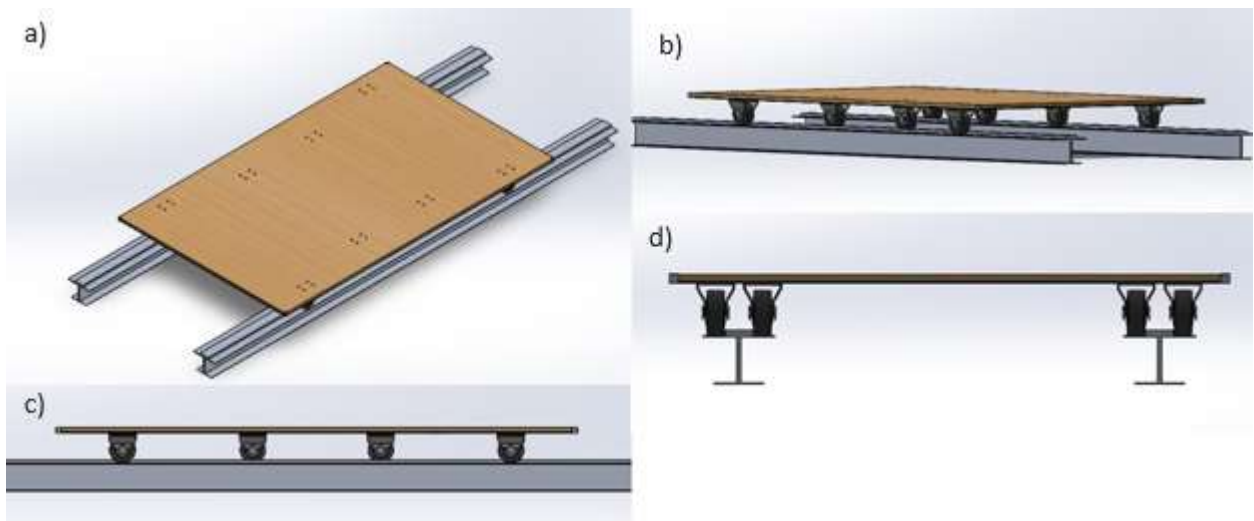


Figura 27 - Modelo de plataforma com 8 rodas. a) vista isométrica. b) vista lateral com inclinação. c) vista lateral. d) vista frontal.

Inicialmente, verificou-se qual a tensão máxima de von Mises e a sua localização. Verificando-se que esta estava abaixo da tensão de cedência do material onde se encontrava, confirmou-se que a deformada máxima observada na plataforma não excedia o valor definido como valor limite. A tensão máxima observada na plataforma foi localizada como sendo num suporte de uma das rodas, como é possível observar na Figura 28. Já a deformada máxima foi observada no centro da plataforma, como é possível observar na Figura 29.

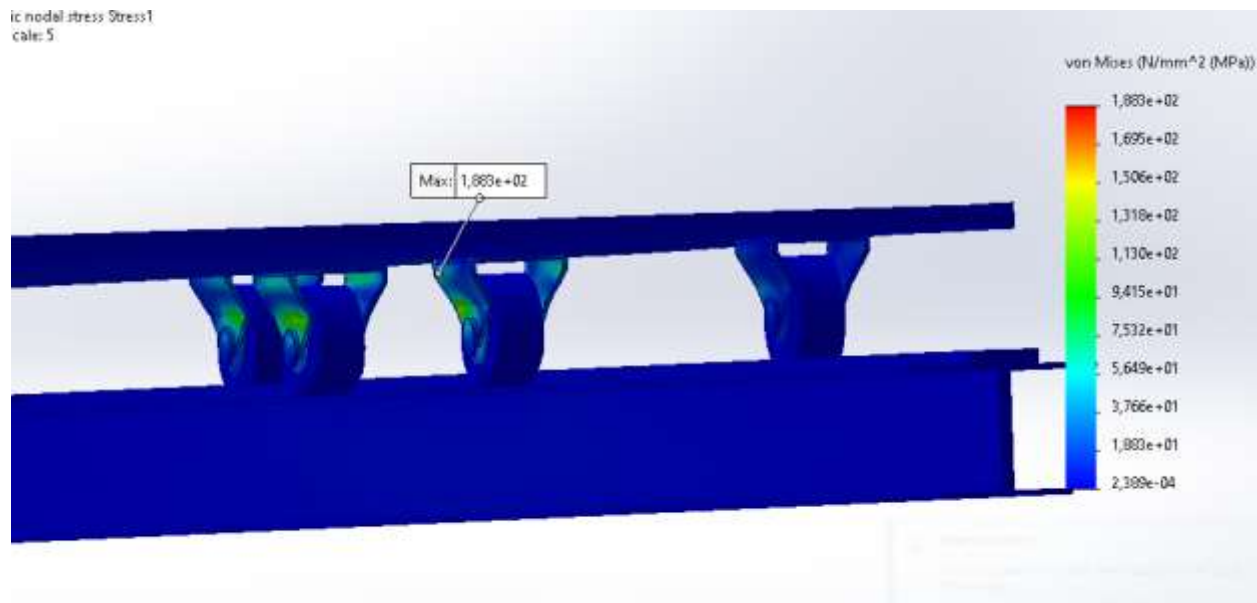


Figura 28 - Tensão máxima de von Mises observada na plataforma com 8 rodas.

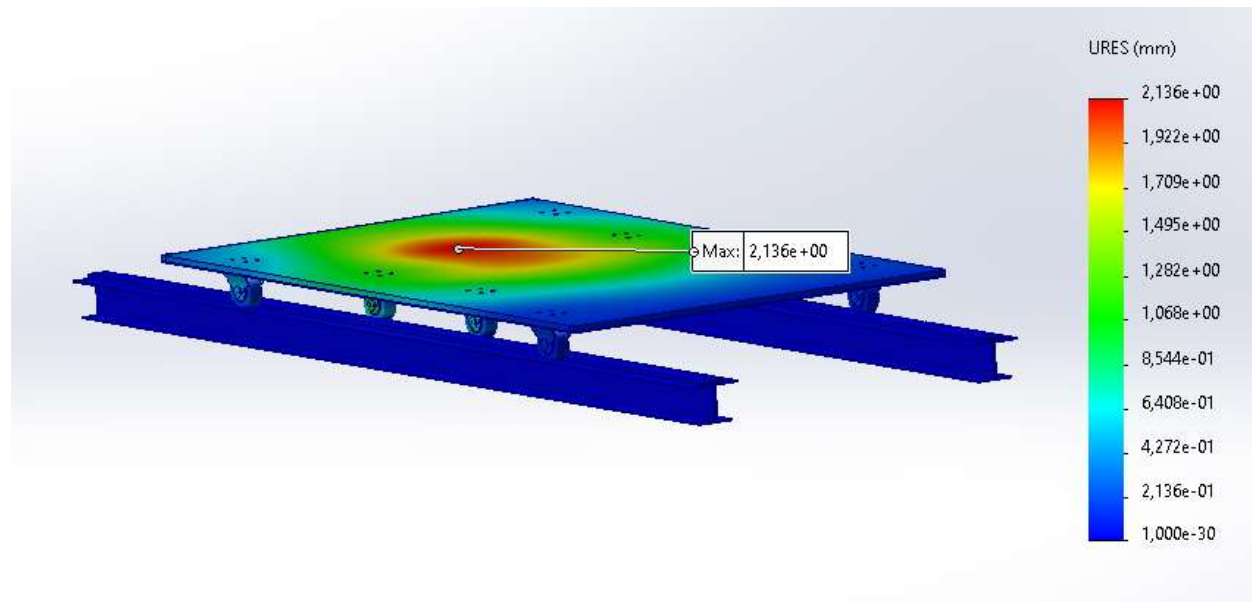


Figura 29 - Valor e localização de deformada máxima observada numa plataforma com 8 rodas.

Estando os valores da deformada e da tensão máxima em conformidade com os critérios previamente definidos procedeu-se à verificação dos parafusos utilizados para unir as rodas à plataforma. O procedimento para verificar se os parafusos estavam “OK” ou “Precisam de atenção”, nomenclatura utilizada no programa, já foram explicados anteriormente. No estudo com oito rodas existem trinta e dois parafusos a analisar, sendo que cada roda é fixa por quatro

parafusos. Depois de realizado o estudo verificou-se que todos os parafusos da plataforma se encontravam “OK”, como é possível observar na Figura 30, ou seja não existe nenhum parafuso em que o coeficiente de segurança calculado seja inferior a 2.

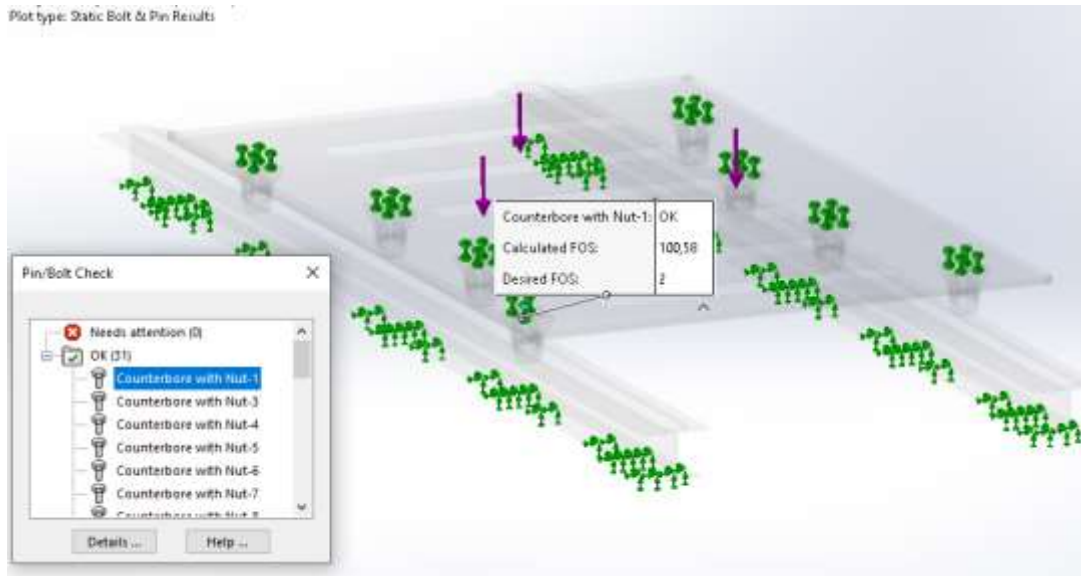


Figura 30 - Condição dos parafusos após estudo com 8 rodas.

O parafuso com o maior coeficiente de segurança calculado é o parafuso que se encontra sobre menos tensão. É o parafuso, apresentado na Figura 30, que se encontra mais longe das cargas aplicadas no estudo. Já o parafuso submetido a uma maior tensão é o parafuso que apresenta o menor coeficiente de segurança, sendo este o parafuso de uma roda no centro da plataforma, como é possível observar na Figura 31.

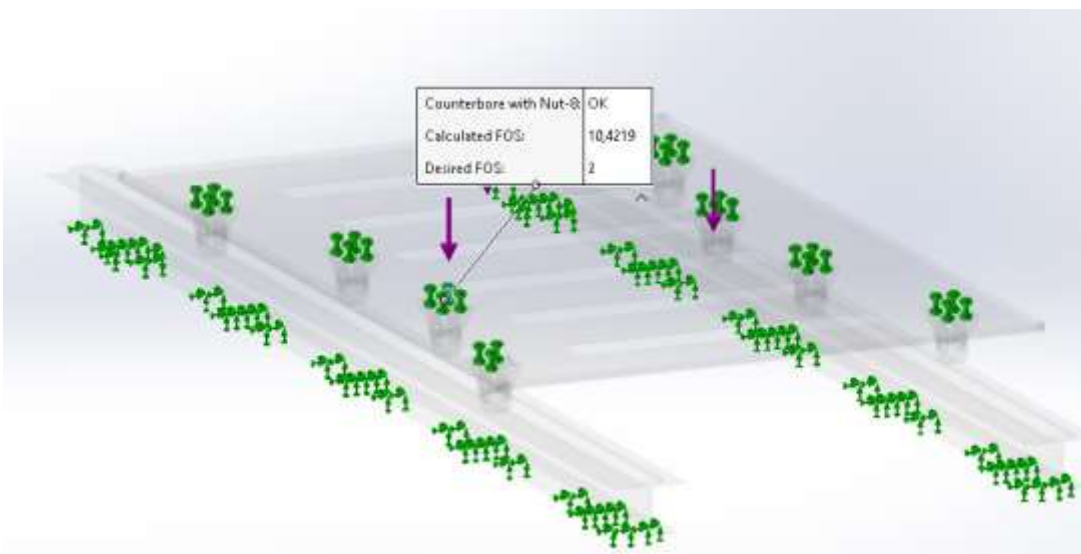


Figura 31 - Parafuso com o menor coeficiente de segurança calculado no estudo com 8 rodas.

2ª Hipótese

Com o objetivo de tentar otimizar-se ao máximo a plataforma projetada e, sendo que a plataforma com oito rodas cumpre os requisitos necessários, procedeu-se à remoção de duas rodas no centro da plataforma, como é possível observar na Figura 32. Esta remoção de duas rodas levará a que cada roda esteja sobre uma maior tensão e que cada parafuso seja sujeito a uma força de corte, axial e momento fletor maior. Isto acontece, pois, as cargas aplicadas continuam as mesmas e existem menos rodas e parafusos pelos quais distribuir as forças.

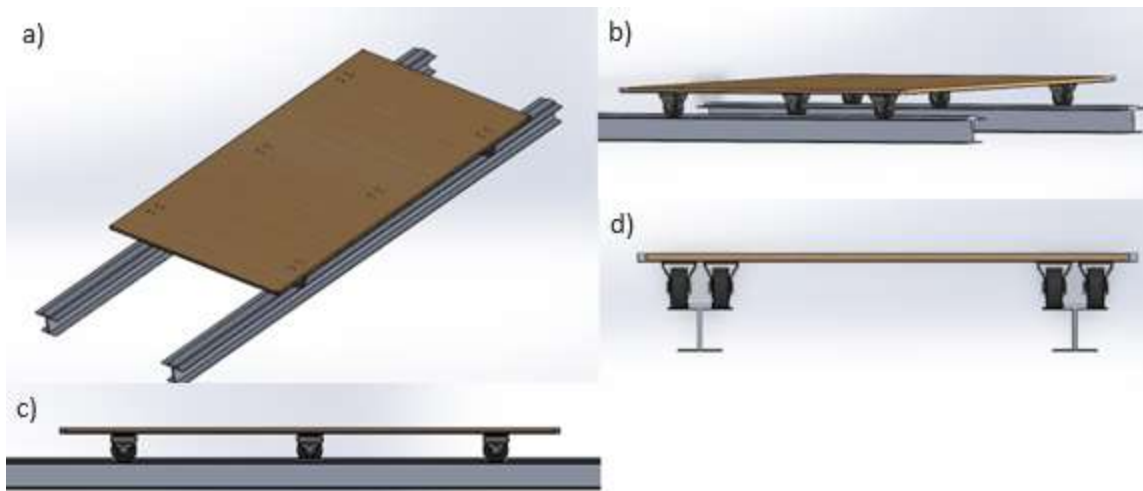


Figura 32 - Modelo de plataforma com 6 rodas. a) vista isométrica. b) vista lateral com inclinação. c) vista lateral. d) vista frontal.

À semelhança do realizado anteriormente confirmou-se que a tensão máxima de von Mises e o valor da deformada máxima não ultrapassava os valores previamente definidos. No estudo com seis rodas, o valor máximo de tensão de von Mises foi observado num suporte de uma roda central, como é possível observar na Figura 33. A tensão de von Mises mais elevada, tal como no modelo com oito rodas é numa zona de concentração de tensões onde existe mudança de geometria. Já a deformada máxima, como expectável, mantém-se no centro da plataforma, como é possível observar na Figura 34.

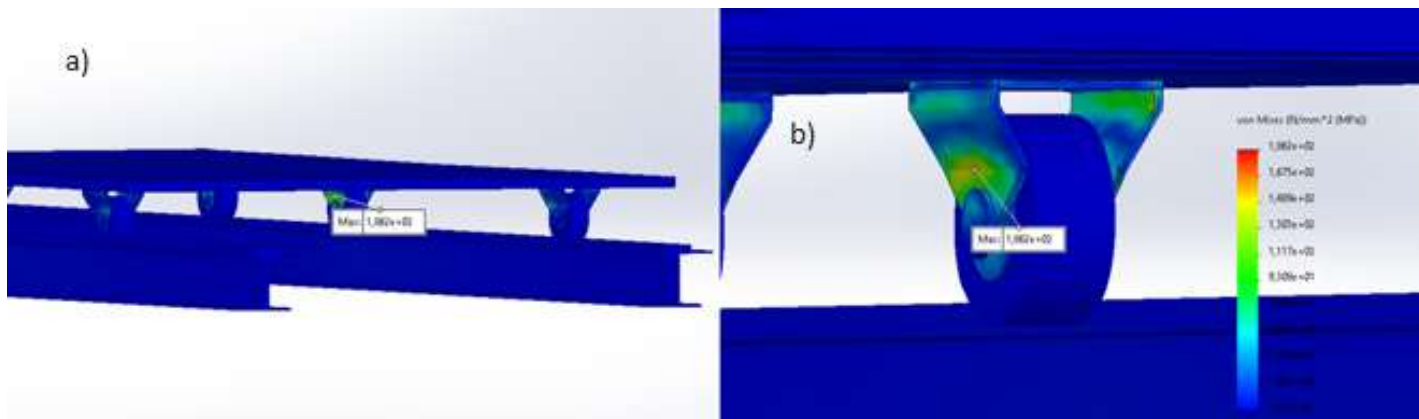


Figura 34 - Tensão máxima de von Mises observada na plataforma com 6 rodas. a) vista geral. b) vista ampliada.

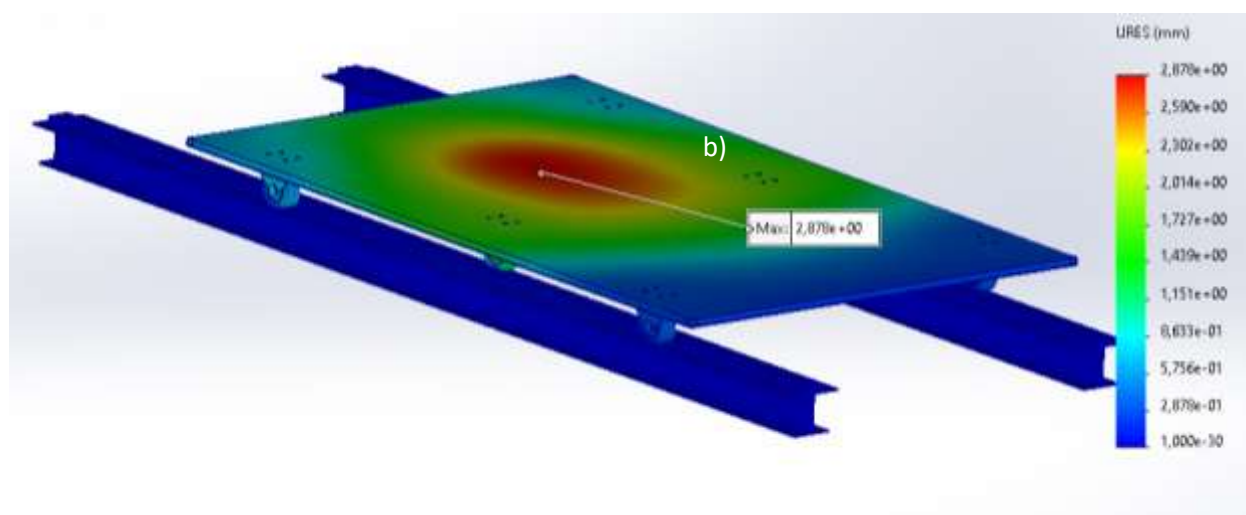


Figura 33 – Valor e localização de deformada máxima observada numa plataforma com 6 rodas.

Estando os valores da deformada e da tensão máxima em conformidade com os critérios previamente definidos procedeu-se à verificação dos parafusos utilizados para unir as rodas à plataforma. O procedimento para verificar se os parafusos estavam “OK” ou “Precisam de atenção”, nomenclatura utilizada no programa, já foram explicados anteriormente. No estudo com seis rodas existem vinte e quatro parafusos a analisar, sendo que cada roda é fixa por quatro parafusos. Depois de realizado o estudo verificou-se que todos os parafusos da plataforma se encontravam “OK”, como é possível observar na Figura 35, ou seja, não existe nenhum parafuso em que o coeficiente de segurança calculado seja inferior a 2.

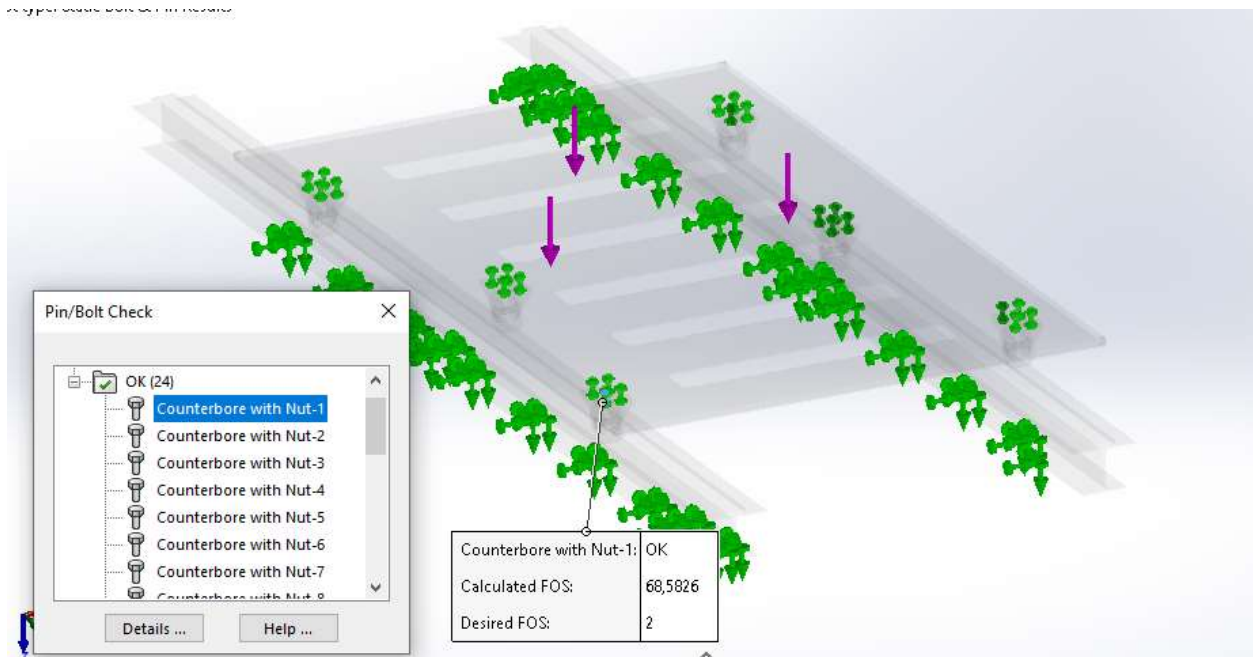


Figura 35 - Condição dos parafusos após estudo com 6 rodas.

Como é possível verificar na Figura 35, analisou-se o mesmo parafuso que no modelo com 8 rodas; no entanto o coeficiente de segurança no modelo com 8 rodas era de 100,58 sendo no modelo com 6 rodas de 68,58, o que significa que o parafuso está sujeito a tensões resultantes superiores.

3ª Hipótese

Dado a plataforma com seis rodas também cumprir com os requisitos previamente mencionados decidiu-se testar o modelo em que apenas existiam as rodas dos vértices da plataforma. As condições de projeto, ao manterem-se as mesmas, significa que é expectável que a deformada no centro da plataforma aumente significativamente dado não existir rodas no centro a servir de suporte. Ao retirarem-se duas rodas também se vai refletir num maior esforço por parafuso. Devido à falta de suporte que mais duas rodas traziam, a tensão de von Mises aumentou significativamente para valores que ultrapassam os valores da tensão de cedência do material, o que inviabiliza a hipótese com apenas quatro rodas. A tensão máxima de von Mises observa-se, como nos estudos anteriores, numa zona de concentração de tensões. Neste caso aparece num suporte de uma roda onde, como se pode observar na Figura 36, está à compressão devido à carga aplicada. Já a deformada aumenta para próximo do valor definido como valor limite, como é possível observar na Figura 37.

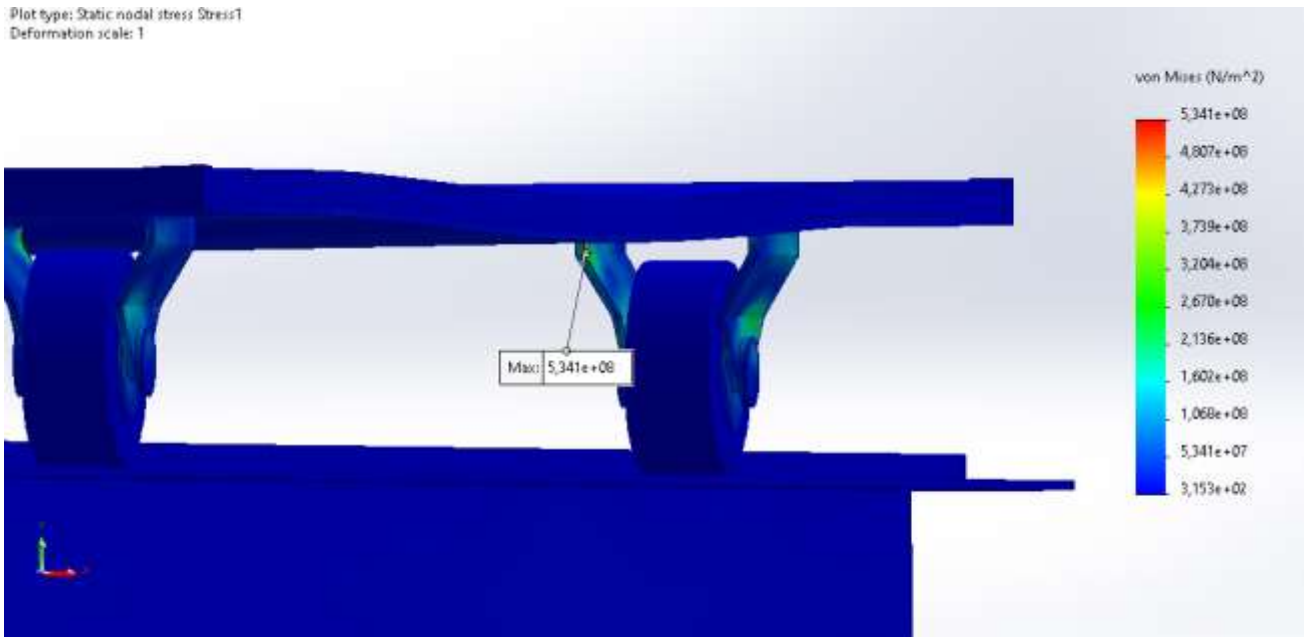


Figura 36 - Tensão máxima de von Mises observada na plataforma com 4 rodas.

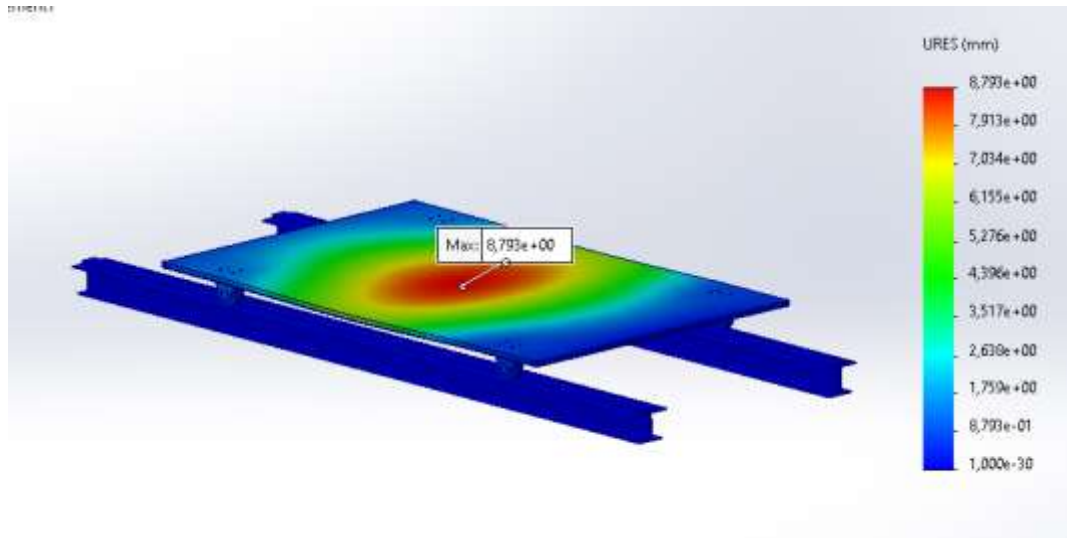


Figura 37 - Valor e localização de deformada máxima observada numa plataforma com 4 rodas.

Embora a plataforma com quatro rodas não cumpra os requisitos necessários para ser considerada como uma hipótese válida, decidiu-se estudar os parafusos para se ter termo de comparação de quanto é que diminuiria o coeficiente de segurança calculado para cada parafuso. Para o estudo com quatro rodas existem dezasseis parafusos sendo que todos eles, com as condições de projeto iguais, deram “OK”, como é possível verificar na Figura 38. Voltando a analisar o parafuso que fica mais longe das cargas aplicadas pôde verificar-se um decréscimo no coeficiente de segurança calculado o que significa que está mais perto da falha que nos casos com seis e oito rodas.

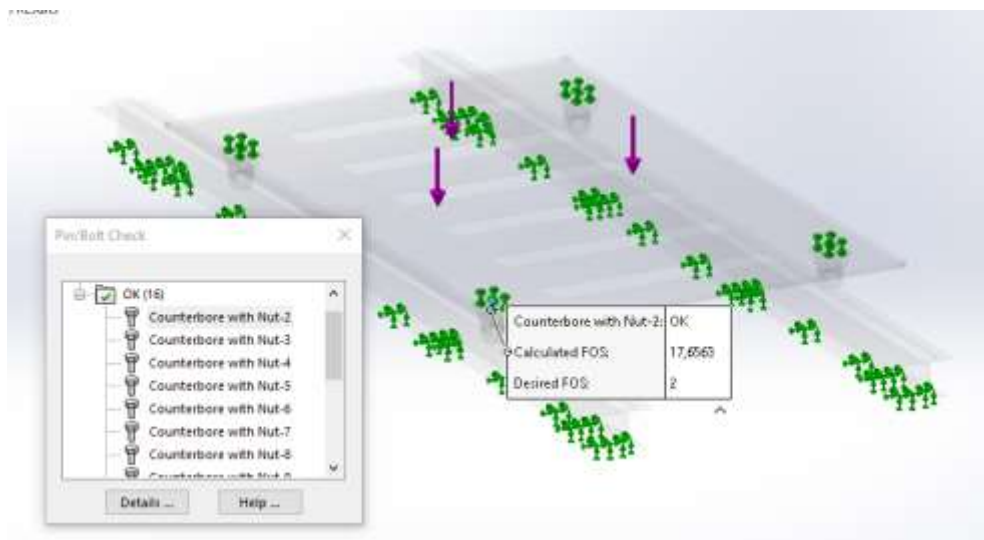


Figura 38 - Condição dos parafusos após estudo com 4 rodas.

A Tabela 11, abaixo apresentada, compara os resultados dos coeficientes de segurança calculados dos parafusos na roda mais próxima das cargas aplicadas, como é possível observar na Figura 39.

Tabela 11 - Comparação de valores de coeficiente de segurança calculado para uma roda comum nos três estudos estando mais próxima das cargas aplicadas.

Número de rodas	Número do parafuso	Coeficiente de segurança calculado
8	Parafuso 1	18,31
	Parafuso 2	13,29
	Parafuso 3	21,06
	Parafuso 4	22,01
6	Parafuso 1	12,29
	Parafuso 2	8,81
	Parafuso 3	16,48
	Parafuso 4	16,57
4	Parafuso 1	4,67
	Parafuso 2	3,31
	Parafuso 3	9,21
	Parafuso 4	8,92

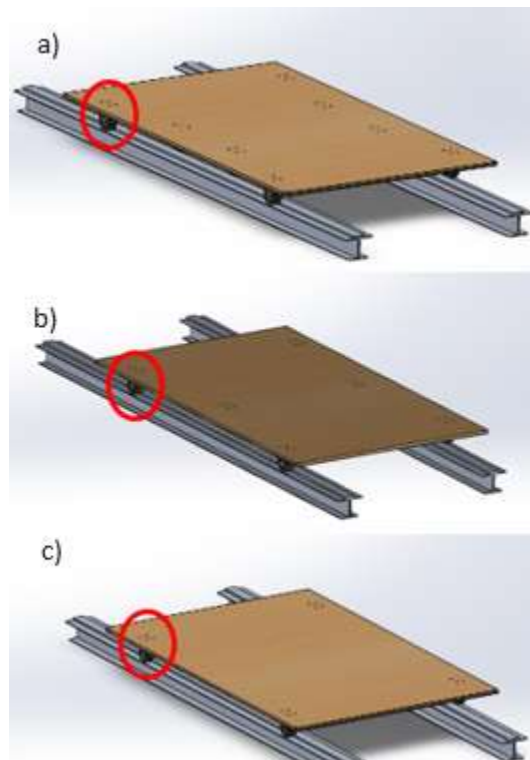


Figura 39 - Localização da roda utilizada para comparação de resultados de coeficiente de segurança calculados. a) modelo com 8 rodas. b) modelo com 6 rodas. c) modelo com 4 rodas.

Após o processo evolutivo da escolha do número indicado de rodas que satisfaça os requisitos iniciais, decidiu-se optar por uma plataforma com seis rodas aparafusadas ao “corpo da plataforma”. A distribuição das rodas na plataforma é de uma roda em cada vértice no exterior da calha e duas rodas no centro da plataforma na parte interior da calha. Esta distribuição ajuda a suportar cargas elevadas que possam existir no centro da plataforma bem como no bloqueio da plataforma sobre a calha.

4.2.3. Sistema de travagem

Uma das oportunidades de melhoria encontradas no método utilizado atualmente é a adição de um modo de travagem da plataforma nas calhas do avião. Atualmente, as placas de contraplacado bloqueiam-se entre si quando estão todas colocadas, mas as plataformas projetadas irão ser independentes umas das outras. Logo têm, obrigatoriamente, de ter um sistema que as trave nas calhas.

O sistema de travagem das plataformas móveis não necessita de ser muito complexo pois apenas serve para pequenas inclinações do avião ou pequenos toques que possa sofrer quando das tarefas de manutenção. A plataforma está a ser projetada para que as cargas que sofre, sejam apenas de carácter vertical descendente, que é o que acontece quando se coloca algo na parte superior da plataforma. No entanto, pode sempre existir uma pequena inclinação, como por exemplo o avião não ter o trem de aterragem colocado e o avião estar sobre tripés que não estão perfeitamente nivelados levando a que a plataforma se mova. Tentou-se simplificar ao máximo a utilização do sistema de travagem com o objetivo de este ser mais bem recebido pelos técnicos que vão utilizar as plataformas. Posto isto, procedeu-se à modelação de um sistema de travagem que consiste num pino que bloqueia a plataforma, entrando na calha onde esta assenta, como é possível observar na Figura 40.

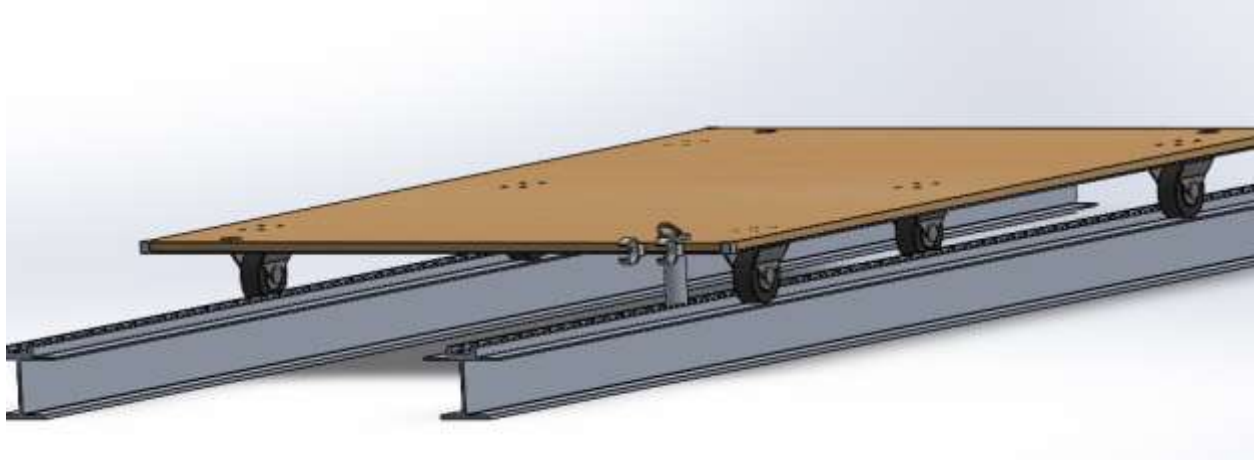


Figura 40 - Sistema de travagem da plataforma móvel.

O pino que trava a plataforma é feito na mesma liga de alumínio que é feita a parte inferior do “corpo da plataforma”, liga de alumínio alloy 2018. A zona onde o pino entra na calha, como é possível observar na Figura 41, é a zona onde, quando os assentos do avião estão colocados, também bloqueiam, facilitando assim o sistema de travagem da plataforma. Foi também modelado um suporte em plástico para o travão que é possível observar na Figura 40.

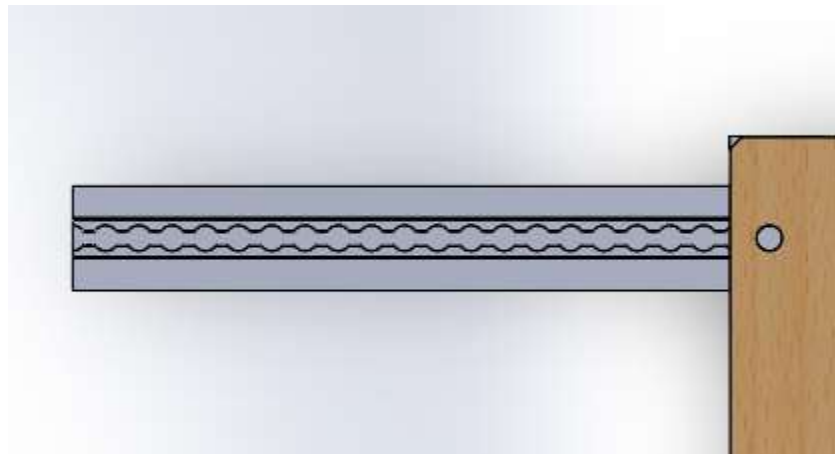


Figura 41 - Vista superior da calha onde assenta a plataforma.

4.2.4. Suporte de apoio à deslocação

Para facilitar a deslocação da plataforma sobre as calhas projetou-se um suporte que permite aos técnicos mover a plataforma sem terem de se baixar para tal. O suporte modelado consiste num perfil de liga de alumínio alloy 2018 com um diâmetro de 10 mm que é fixado ao “corpo da plataforma”, como é possível observar na Figura 42. Foi aparafusado, de cada um dos lados da plataforma, um suporte fixo onde o perfil de liga de alumínio irá juntar-se e girar sobre o mesmo, como é possível observar na Figura 43. De forma a facilitar a deslocação e preservar o bem-estar de quem com esta trabalha adicionou-se, ainda, um revestimento de borracha à volta do local onde os técnicos irão atuar na plataforma.

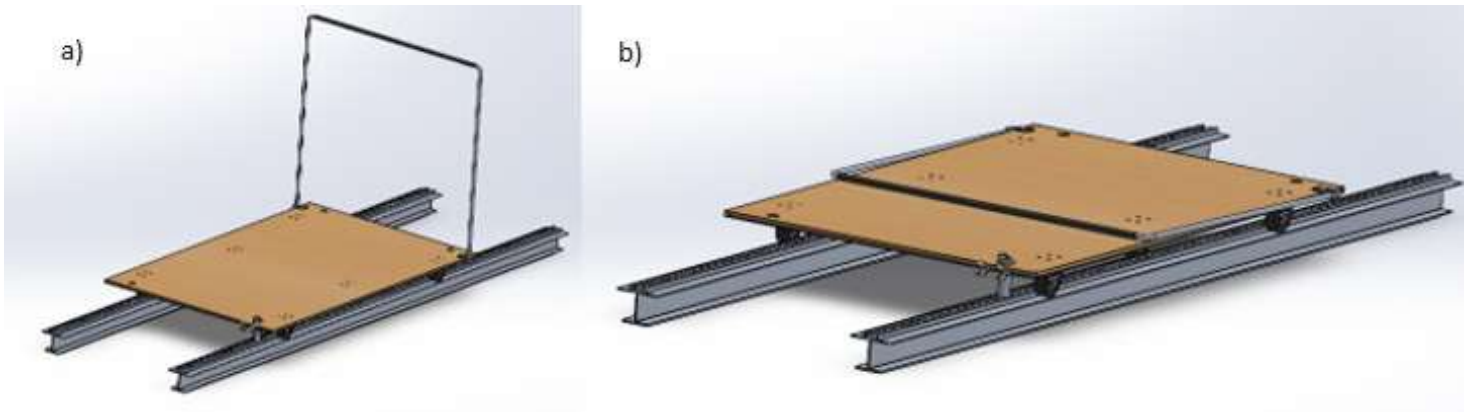


Figura 42 - Plataforma com suporte de ajuda à deslocação. a) modelo com suporte na posição de utilização. b) modelo com suporte fechado.

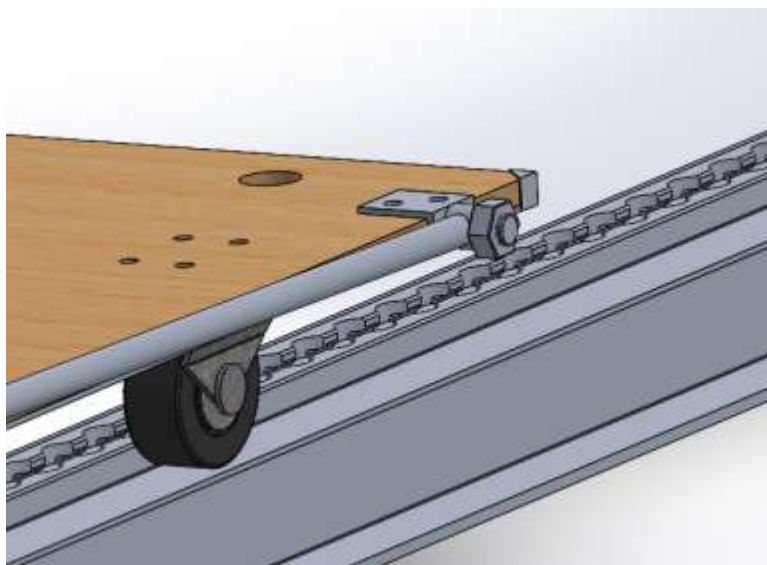


Figura 43 - Local de fixação do suporte de ajuda à deslocação.

4.2.5. Avisos gerais na plataforma

Para evitar uma utilização errada da plataforma móvel decidiu colocar-se alguns avisos pintados na plataforma, como é possível observar na Figura 44. Os avisos colocados na plataforma servem para tentar prevenir a má utilização da plataforma e, assim, evitar que existam acidentes quando da utilização da mesma. Pintaram-se a verde as zonas ideais para se colocar o material sobre a plataforma com o devido aviso que apenas se devem colocar no máximo 50 Kg em cada zona, perfazendo assim o total de 150 Kg com que se realizaram os estudos. Pintou-se também um aviso sobre a impossibilidade de se andar sobre a plataforma já que esta não está preparada para a instabilidade que um corpo móvel teria sobre a mesma.

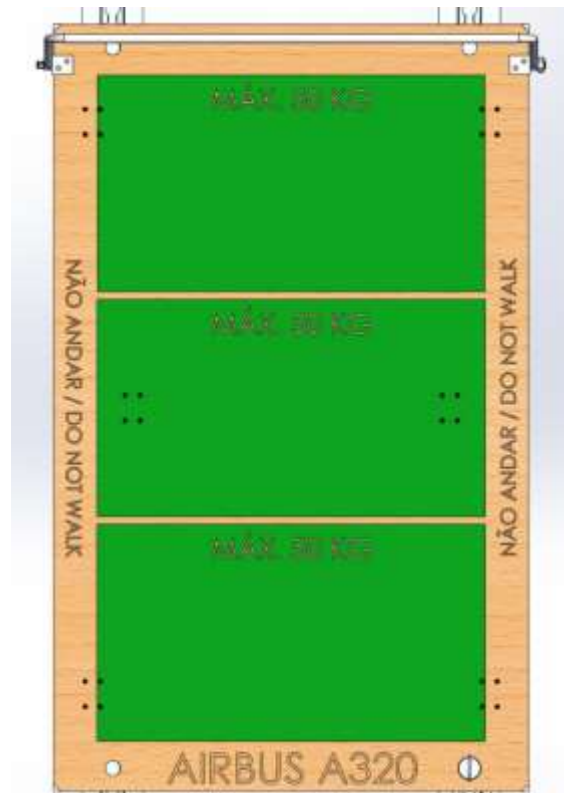


Figura 44 - Localização dos avisos pintados na plataforma.

4.2.6. Estudo final

Para finalizar o projeto da plataforma realizou-se um estudo final onde se tentou que os resultados se aproximassem ao máximo da realidade. Para tal efeito, refinou-se a malha, como é possível observar na Figura 45, com o objetivo de ter os resultados mais fidedignos. É possível comparar o tamanho dos elementos nos estudos realizados para os apoios e o tamanho dos elementos no estudo final. No estudo final, a malha das calhas aparece a amarelo pois foi-lhe atribuída uma malha do tipo “rascunho” por não serem necessários os dados das calhas para este projeto. O estudo foi realizado com todas as partes constituintes da plataforma móvel, nas calhas reais. As condições de projeto mantiveram-se iguais aos estudos do “corpo da plataforma” e aos estudos dos apoios, três cargas de 50 Kg, as calhas encastradas na parte inferior e os apoios da plataforma (rodas) simplesmente apoiadas nas calhas.

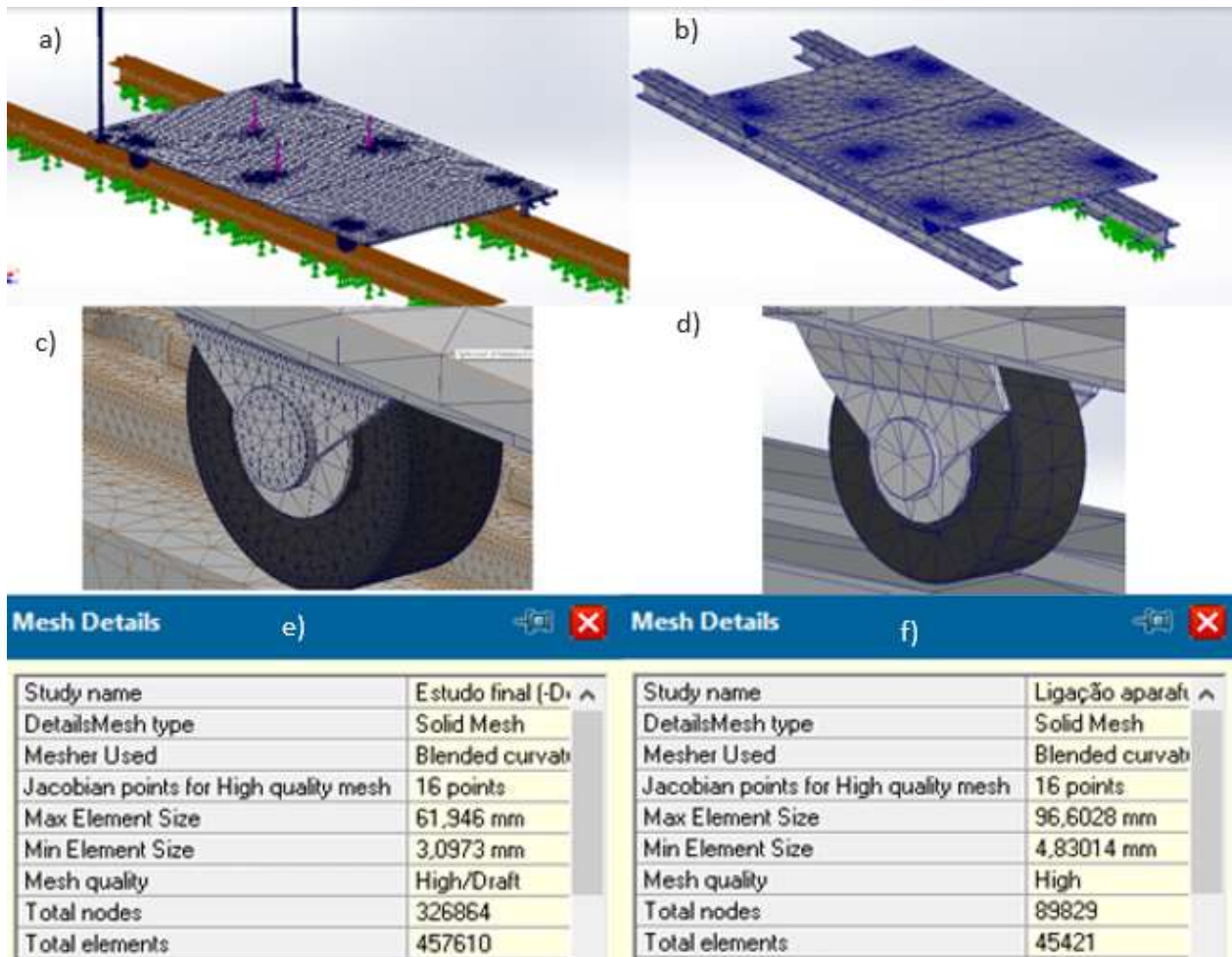


Figura 45 - Comparação de refinamento de malha no estudo final e no estudo dos apoios da plataforma. a) aspeto da malha no estudo final. b) aspeto da malha no estudo dos apoios da plataforma. c) aspeto da malha na roda no estudo final. d) aspeto da malha na roda no estudo dos apoios da Plataforma. e) Detalhes da malha no estudo final. f) Detalhes da malha no estudo dos apoios da plataforma

No seguimento do refinamento da malha foi realizado o estudo. Na Tabela 12 é possível observar uma comparação entre os valores obtidos e os valores desejados no estudo final.

Tabela 12 - Comparação dos valores desejados e dos valores obtidos.

	Valor máximo desejado	Valor máximo obtido
Tensão máxima	Tensão de cedência / C.S. = 351,5MPa / 1,5 = 234,33 MPa	219,7 MPa
Deformada máxima	10 mm	2,73 mm

Realizou-se ainda uma análise aos parafusos constituintes da plataforma podendo o resultado ser observado na Tabela 13.

Tabela 13 - Valores de coeficiente de segurança mínimo comparativamente com os valores de coeficiente de segurança calculados dos parafusos.

	Coeficiente de Segurança mínimo	Coeficiente de segurança calculado
Parafuso 1	2	79,44
Parafuso 2	2	52,63
Parafuso 3	2	30,28
Parafuso 4	2	22,01
Parafuso 5	2	12,36
Parafuso 6	2	11,03
Parafuso 7	2	12,05
Parafuso 8	2	8,76
Parafuso 9	2	12,54
Parafuso 10	2	9,43
Parafuso 11	2	20,65
Parafuso 12	2	20,36
Parafuso 13	2	48,6
Parafuso 14	2	60,99
Parafuso 15	2	20,71
Parafuso 16	2	27,25
Parafuso 17	2	10,55
Parafuso 18	2	11,82
Parafuso 19	2	8,59
Parafuso 20	2	11,87
Parafuso 21	2	9,24
Parafuso 22	2	12,61
Parafuso 23	2	19,75
Parafuso 24	2	20,11

Como é possível observar nas Tabelas 12 e 13, a plataforma cumpre com as considerações iniciais quer de valores de tensões, quer de valores de deformada, quer de valores de coeficientes de segurança dos parafusos. Posto isto, considerou-se que o projeto da plataforma com um “corpo de plataforma” feito em madeira de balsa e liga de alumínio alloy 2018, com seis rodas a servir de apoios, com um sistema de travagem e um suporte para apoio à deslocação estava bem dimensionado. É possível observar a plataforma móvel, depois de renderizada, na Figura 46.

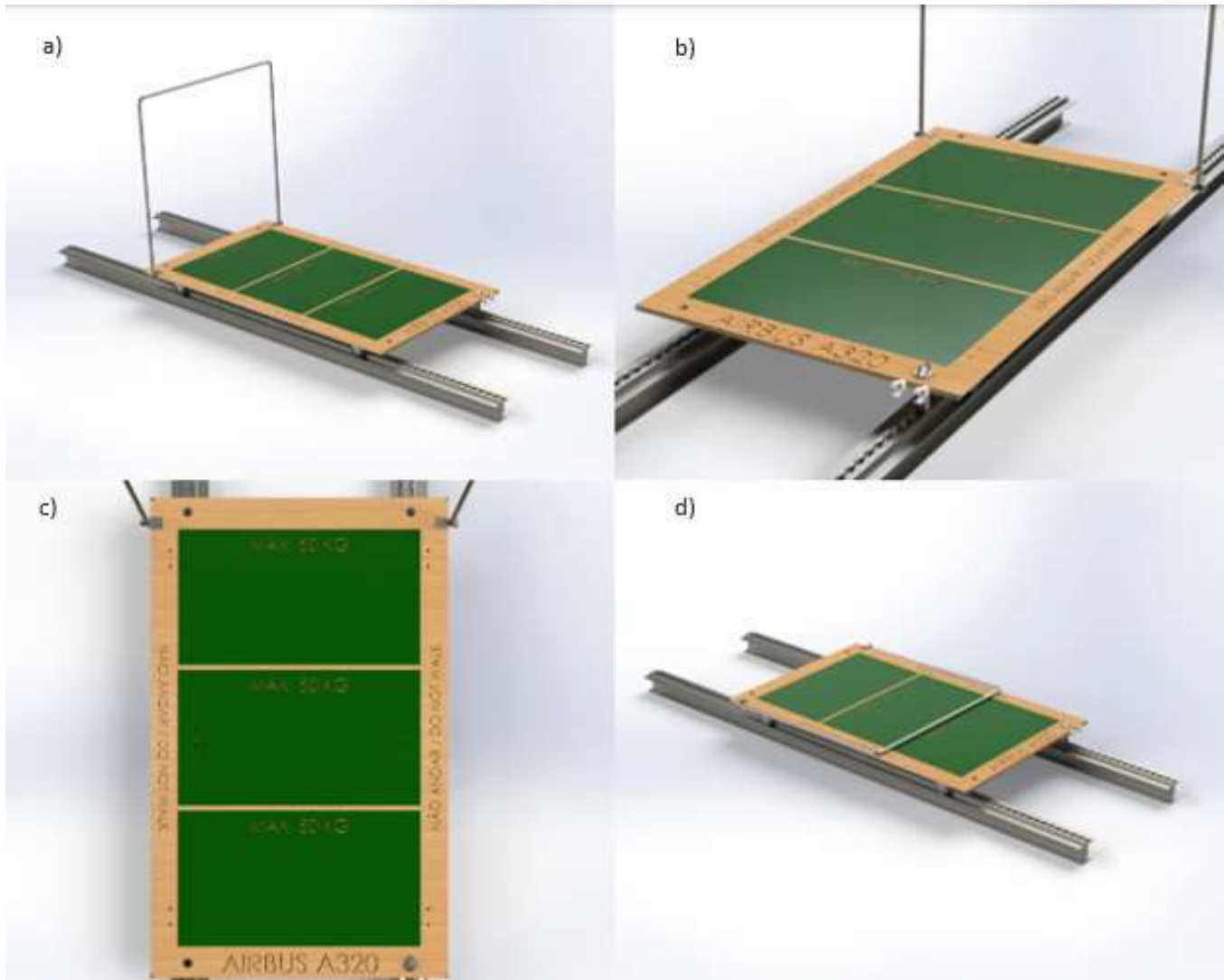


Figura 46 - Plataforma móvel renderizada. a) Plataforma montada (vista lateral esquerda). b) Plataforma montada (vista lateral direita). c) Plataforma montada (vista de planta). d) Plataforma fechada (vista lateral esquerda).

5. Conclusão

Com o trabalho realizado foi possível projetar uma plataforma móvel de apoio às tarefas de manutenção dentro de um Airbus A320. A aplicação de técnicas de melhoria contínua, em articulação com o conhecimento da forma como se realizam as tarefas de manutenção, permitiu a realização de uma plataforma móvel específica e fundamentada.

O desenvolvimento da plataforma teve como pressuposto a eliminação/minimização dos desperdícios e perigos inerentes à forma como se realizam atualmente as tarefas de manutenção. São considerados desperdícios, o tempo de espera para se iniciar as tarefas de manutenção, o tempo de colocação de todas as placas de contraplacado, as deslocações realizadas em excesso para se colocarem todas as placas, o transporte de todas as placas. São considerados desperdícios, pois não acrescentam valor ao processo que é a manutenção. Já o perigo considerado está associado à deslocação dos técnicos sobre as placas de contraplacado sem estas estarem fixas às calhas e à deslocação ao carregar material. A plataforma móvel traz uma diminuição de tempo de colocação das placas, pois não é necessário preencher o chão todo do avião e traz um aumento na segurança, pois os técnicos poderão deslocar-se sem terem de carregar os materiais.

Uma das preocupações permanentes, durante o desenvolvimento do projeto, foi tentar tornar a plataforma o mais leve possível para facilitar o seu transporte, sendo que o seu peso limite era de 5 Kg. A plataforma móvel final, ficou com um peso de 4,8 Kg (4777,31 g), que é um peso aceitável para transporte.

Após todo o processo evolutivo de projeto da plataforma esta ficou com 620 x 1000 [mm], constituída por um “corpo de plataforma” de madeira de balsa e liga de alumínio alloy 2018, com seis rodas a servir de apoios, um sistema de travagem e um suporte de apoio à deslocação.

Concluindo, com o desenvolvimento desta plataforma não se espera que este seja o processo com a maior eficiência possível, no entanto reduzem-se certos desperdícios hoje presentes na forma como se realizam as tarefas de manutenção. Esta plataforma móvel é um apoio às tarefas de manutenção e não um novo método de as realizar.

5.1. Limitações ao trabalho projetado

Todos os projetos têm espaço para melhoria e este não é exceção. Tal como o processo projetado pela Airbus tem limitações, também é possível identificar algumas limitações da plataforma projetada. A limitação que mais sobressai é a de que quando colocadas nas calhas, as plataformas, não se podem cruzar, tendo estas de trabalhar série. Por isso, se os técnicos quiserem cruzar-se e levar consigo as ferramentas que estão a utilizar, terão de trocar o material de plataforma, resultando em desperdício. Outra limitação da plataforma móvel é a incapacidade da mesma em suportar cargas móveis, sendo esta apenas para material e não para os técnicos. A dimensão da plataforma dificulta o seu transporte e, esta situação, também existente nas placas de contraplacado, pode ser vista como uma limitação dado não existir uma pega ou rodas que facilitem o seu transporte.

Estas são algumas limitações do trabalho projetado, nunca esquecendo que a maior limitação é a dificuldade de implementação de um método novo.

5.2. Propostas de trabalho futuro

Nunca um projeto é considerado como “o projeto perfeito” e existem sempre melhorias que podem ser realizadas. O trabalho projetado foi baseado no conhecimento do autor, no entanto existem melhorias que podem ser realizadas de forma a tornar a plataforma móvel mais eficaz. Alguns exemplos de melhorias para trabalho futuro:

- Tornar a plataforma móvel adaptável a qualquer avião da fabricante Airbus.
- Adaptar a plataforma de forma a ser possível a deslocação sobre a mesma.
- Otimizar a plataforma com o objetivo de a tornar o mais leve possível, facilitando assim o seu transporte.
- Adaptar a plataforma para que esta se mova verticalmente.

6. Referências bibliográficas

- [1] “Porto Editora – manutenção no Dicionário infopédia da Língua Portuguesa [em linha]. Porto: Porto Editora. [consult. 2023-03-16 23:28:12]. Disponível em <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/manutenção>.”
- [2] “European Standard NP EN 13306, versão Portuguesa - Terminologia da Manutenção, 2007.”
- [3] P. Miguel de Sá Pereira, O. na Empresa, E. Vitor Matoso Orientador na FEUP, and B. Almada-Lobo, “Planos de Manutenção Preventiva Manutenção de Equipamentos Variáveis na BA Vidro, SA,” 2009.
- [4] H. Kinnison and T. Siddiqui, *Aviation Maintenance Management*, Second Edition. McGraw Hill Professional, 2012, 2004. ISBN: 9780071505239.
- [5] EASA, “Design Organisations Approvals.” Accessed: Jun. 27, 2023. [Online]. Available: EASA website - <https://www.easa.europa.eu/en/domains/aircraft-products/design-organisations/design-organisations-approvals#group-easa-downloads>
- [6] F. Voehl, H. J. Harrington, C. Mignosa, and Ri. Charron, *The Lean Six Sigma - Black Belt Handbook*. 2013. doi: <https://doi.org/10.1201/b15163>.
- [7] I. Kato and A. Smalley, *Toyota Kaizen Methods - Six Steps to Improvement*. New York: Productivity Press, 2010. doi: <https://doi.org/10.1201/b10296>.
- [8] J. Liker and J. Franz, *The Toyota Way to continuous improvement*. MCGRAW-HILL EDUCATION - EUROPE, 2011. ISBN: 9780071477468.
- [9] G. L. Duffy, *Modular Kaizen - Continuous and breakthrough improvement*. Quality Press, 2013. ISBN: 978-0873898645.
- [10] T. V. Stern, *Lean and Agile Project Management*, 1st Edition. New York: Productivity Press. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315166087>.
- [11] American Society for Quality, “Total Quality Management.” Accessed: Apr. 15, 2023. [Online]. Available: <https://asq.org/quality-resources/total-quality-management>
- [12] M. Hirst and T. M. Young, *Innovation in aeronautics*, 1st Edition. 2022. ISBN: 9781845695507.

- [13] Dassault Systèmes, “Mesh Types.” Accessed: May 18, 2023. [Online]. Available: https://help.solidworks.com/2021/english/SolidWorks/cworks/c_element_types.htm
- [14] M. Borrega and L. J. Gibson, “Mechanics of balsa (*Ochroma pyramidale*) wood,” *Mechanics of Materials*, vol. 84, pp. 75–90, 2015, doi: 10.1016/j.mechmat.2015.01.014.
- [15] Waldunsteel, “AÇO CARBONO AISI 1020.” Accessed: Jun. 28, 2023. [Online]. Available: <https://waldunsteel.com/pt/produtos/aisi-1020-aco-carbono/>
- [16] AZO Materials, “Aluminum 2018 Alloy (UNS A92018).” Accessed: Jun. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8719>
- [17] Elesa, “Castors and Wheels Catalogue 151.RE.”
- [18] R.C. Adams, Suresh Advan, and Et al., “ASM Handbook VOLUME 21 Composites,” 2001.

Apêndice I. Forças e momentos sentidos em cada parafuso nos estudos realizados com 8, 6 e 4 rodas, respetivamente.

Tipo de força	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Resultante	Parafuso
Shear Force (N)	-2,9802	0	2,1525	3,6763	Counterbore with Nut-1
Axial Force (N)	0	-3,6211	0	3,6211	Counterbore with Nut-1
Bending moment (N.m)	0,022409	0	0,033304	0,040141	Counterbore with Nut-1
Shear Force (N)	-0,016928	0	4,4382	4,4382	Counterbore with Nut-2
Axial Force (N)	0	-0,22618	0	0,22618	Counterbore with Nut-2
Bending moment (N.m)	0,046864	0	-2,85E-05	0,046864	Counterbore with Nut-2
Shear Force (N)	-4,2421	0	7,7559	8,8402	Counterbore with Nut-3
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-3
Bending moment (N.m)	0,081043	0	0,045992	0,093184	Counterbore with Nut-3
Shear Force (N)	-7,389	0	10,646	12,959	Counterbore with Nut-4
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-4
Bending moment (N.m)	0,11049	0	0,077833	0,13515	Counterbore with Nut-4
Shear Force (N)	-16,076	0	11,178	19,581	Counterbore with Nut-5
Axial Force (N)	0	-17,064	0	17,064	Counterbore with Nut-5
Bending moment (N.m)	0,11334	0	0,17551	0,20892	Counterbore with Nut-5
Shear Force (N)	-7,4412	0	17,325	18,855	Counterbore with Nut-6
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-6
Bending moment (N.m)	0,18313	0	0,080708	0,20013	Counterbore with Nut-6
Shear Force (N)	-12,781	-0,005761	20,711	24,337	Counterbore with Nut-7
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-7
Bending moment (N.m)	0,21656	-3,91E-05	0,14048	0,25814	Counterbore with Nut-7
Shear Force (N)	-28,493	-0,006989	25,126	37,989	Counterbore with Nut-8
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-8
Bending moment (N.m)	0,25653	-8,42E-05	0,30258	0,39668	Counterbore with Nut-8
Shear Force (N)	-22,388	0	-7,0926	23,485	Counterbore with Nut-9
Axial Force (N)	0	-4,3831	0	4,3831	Counterbore with Nut-9
Bending moment (N.m)	-0,077142	0	0,24657	0,25836	Counterbore with Nut-9
Shear Force (N)	-30,877	0	-3,6958	31,097	Counterbore with Nut-10
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-10
Bending moment (N.m)	-0,032507	0	0,3287	0,33031	Counterbore with Nut-10
Shear Force (N)	-28,407	0,000507	-1,8245	28,466	Counterbore with Nut-11
Axial Force (N)	0	-12,506	-0,003479	12,506	Counterbore with Nut-11
Bending moment (N.m)	-0,015353	-8,65E-05	0,31091	0,31129	Counterbore with Nut-11
Shear Force (N)	-32,265	0,000418	-1,5018	32,299	Counterbore with Nut-12
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-12
Bending moment (N.m)	-0,020569	-9,49E-05	0,34117	0,34179	Counterbore with Nut-12

Shear Force (N)	-19,602	0	-9,4171	21,747	Counterbore with Nut-13
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-13
Bending moment (N.m)	-0,10037	0	0,21454	0,23685	Counterbore with Nut-13
Shear Force (N)	-28,099	0	-12,028	30,565	Counterbore with Nut-14
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-14
Bending moment (N.m)	-0,12055	0	0,29776	0,32124	Counterbore with Nut-14
Shear Force (N)	-17,948	0	-3,2518	18,24	Counterbore with Nut-15
Axial Force (N)	0	-9,3273	0	9,3273	Counterbore with Nut-15
Bending moment (N.m)	-0,031508	0	0,19831	0,2008	Counterbore with Nut-15
Shear Force (N)	-16,766	0	-7,8817	18,526	Counterbore with Nut-16
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-16
Bending moment (N.m)	-0,086395	0	0,17891	0,19868	Counterbore with Nut-16
Shear Force (N)	-0,11173	0	4,4314	4,4328	Counterbore with Nut-17
Axial Force (N)	0	-0,691	0	0,691	Counterbore with Nut-17
Bending moment (N.m)	0,046879	0	0,0012488	0,046895	Counterbore with Nut-17
Shear Force (N)	3,0045	0	2,116	3,6749	Counterbore with Nut-18
Axial Force (N)	0	-3,9464	0	3,9464	Counterbore with Nut-18
Bending moment (N.m)	0,022056	0	-0,033787	0,040349	Counterbore with Nut-18
Shear Force (N)	7,6246	0	10,477	12,958	Counterbore with Nut-19
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-19
Bending moment (N.m)	0,10809	0	-0,08081	0,13496	Counterbore with Nut-19
Shear Force (N)	3,8293	0	8,6366	9,4475	Counterbore with Nut-20
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-20
Bending moment (N.m)	0,090051	0	-0,041927	0,099333	Counterbore with Nut-20
Shear Force (N)	8,7124	0	15,902	18,133	Counterbore with Nut-21
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-21
Bending moment (N.m)	0,16853	0	-0,095013	0,19346	Counterbore with Nut-21
Shear Force (N)	17,742	0	10,139	20,435	Counterbore with Nut-22
Axial Force (N)	0	-17,52	0	17,52	Counterbore with Nut-22
Bending moment (N.m)	0,10447	0	-0,19546	0,22162	Counterbore with Nut-22
Shear Force (N)	28,801	-0,005782	20,789	35,52	Counterbore with Nut-23
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-23
Bending moment (N.m)	0,21308	8,56E-05	-0,30784	0,37439	Counterbore with Nut-23
Shear Force (N)	11,83	-0,005155	18,532	21,986	Counterbore with Nut-24
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-24
Bending moment (N.m)	0,19533	3,58E-05	-0,12859	0,23386	Counterbore with Nut-24
Shear Force (N)	32,406	0	-4,349	32,696	Counterbore with Nut-25
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-25
Bending moment (N.m)	-0,039768	0	-0,34375	0,34604	Counterbore with Nut-25
Shear Force (N)	23,888	0	-7,4981	25,037	Counterbore with Nut-26
Axial Force (N)	0	-7,3258	0	7,3258	Counterbore with Nut-26

Bending moment (N.m)	-0,080667	0	-0,26165	0,27381	Counterbore with Nut-26
Shear Force (N)	33,616	0,000127	-0,4552	33,619	Counterbore with Nut-27
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-27
Bending moment (N.m)	-0,010801	9,88E-05	-0,35517	0,35533	Counterbore with Nut-27
Shear Force (N)	30,202	0,000331	-1,1916	30,226	Counterbore with Nut-28
Axial Force (N)	0	-13,757	-0,003827	13,757	Counterbore with Nut-28
Bending moment (N.m)	-0,009068	9,14E-05	-0,32848	0,3286	Counterbore with Nut-28
Shear Force (N)	28,144	0	-13,093	31,041	Counterbore with Nut-29
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-29
Bending moment (N.m)	-0,13033	0	-0,29559	0,32305	Counterbore with Nut-29
Shear Force (N)	18,786	0	-11,388	21,969	Counterbore with Nut-30
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-30
Bending moment (N.m)	-0,11971	0	-0,20494	0,23734	Counterbore with Nut-30
Shear Force (N)	16,656	0	-8,6549	18,77	Counterbore with Nut-31
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-31
Bending moment (N.m)	-0,094188	0	-0,17753	0,20097	Counterbore with Nut-31
Shear Force (N)	17,447	0	-3,4795	17,791	Counterbore with Nut-32
Axial Force (N)	0	-9,9206	0	9,9206	Counterbore with Nut-32
Bending moment (N.m)	-0,033657	0	-0,19233	0,19525	Counterbore with Nut-32

Tipo	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Resultante	Parafuso
Shear Force (N)	-4,1589	3,3138	0	5,3177	Counterbore with Nut-1
Axial Force (N)	0	0	5,5264	5,5264	Counterbore with Nut-1
Bending moment (N.m)	0,03437	0,046656	0	0,057949	Counterbore with Nut-1
Shear Force (N)	0,80876	7,7251	0	7,7673	Counterbore with Nut-2
Axial Force (N)	0	0	0,43437	0,43437	Counterbore with Nut-2
Bending moment (N.m)	0,081052	-0,0074	0	0,081389	Counterbore with Nut-2
Shear Force (N)	-7,2832	13,231	0	15,103	Counterbore with Nut-3
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-3
Bending moment (N.m)	0,13714	0,078935	0	0,15823	Counterbore with Nut-3
Shear Force (N)	-11,99	18,473	0	22,023	Counterbore with Nut-4
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-4
Bending moment (N.m)	0,19158	0,12517	0	0,22884	Counterbore with Nut-4
Shear Force (N)	-28,706	9,7057	0	30,302	Counterbore with Nut-5
Axial Force (N)	0	0	20,432	20,432	Counterbore with Nut-5
Bending moment (N.m)	0,09722	0,31748	0	0,33203	Counterbore with Nut-5
Shear Force (N)	-31,25	21,639	0	38,01	Counterbore with Nut-6
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-6
Bending moment (N.m)	0,23281	0,33737	0	0,4099	Counterbore with Nut-6

Shear Force (N)	-31,2	5,4115	0	31,666	Counterbore with Nut-7
Axial Force (N)	0	0	8,0773	8,0773	Counterbore with Nut-7
Bending moment (N.m)	0,060944	0,34372	0	0,34908	Counterbore with Nut-7
Shear Force (N)	-44,773	4,2585	0	44,975	Counterbore with Nut-8
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-8
Bending moment (N.m)	0,038956	0,47823	0	0,47981	Counterbore with Nut-8
Shear Force (N)	-28,909	-14,376	0	32,286	Counterbore with Nut-9
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-9
Bending moment (N.m)	-0,15143	0,31661	0	0,35096	Counterbore with Nut-9
Shear Force (N)	-41,491	-21,397	0	46,684	Counterbore with Nut-10
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-10
Bending moment (N.m)	-0,21587	0,43919	0	0,48937	Counterbore with Nut-10
Shear Force (N)	-20,242	-13,548	0	24,357	Counterbore with Nut-11
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-11
Bending moment (N.m)	-0,14544	0,21582	0	0,26025	Counterbore with Nut-11
Shear Force (N)	-22,259	-4,5581	0	22,721	Counterbore with Nut-12
Axial Force (N)	0	0	13,834	13,834	Counterbore with Nut-12
Bending moment (N.m)	-0,043724	0,24549	0	0,24935	Counterbore with Nut-12
Shear Force (N)	3,9773	3,2926	0	5,1634	Counterbore with Nut-13
Axial Force (N)	0	0	5,2325	5,2325	Counterbore with Nut-13
Bending moment (N.m)	0,033959	-0,04468	0	0,05612	Counterbore with Nut-13
Shear Force (N)	-1,1768	7,8878	0	7,9751	Counterbore with Nut-14
Axial Force (N)	0	0	0,88461	0,88461	Counterbore with Nut-14
Bending moment (N.m)	0,083066	0,011902	0	0,083915	Counterbore with Nut-14
Shear Force (N)	12,843	18,13	0	22,218	Counterbore with Nut-15
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-15
Bending moment (N.m)	0,18595	-0,13593	0	0,23033	Counterbore with Nut-15
Shear Force (N)	7,0645	14,146	0	15,812	Counterbore with Nut-16
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-16
Bending moment (N.m)	0,14699	-0,07786	0	0,16634	Counterbore with Nut-16
Shear Force (N)	32,953	20,893	0	39,019	Counterbore with Nut-17
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-17
Bending moment (N.m)	0,22423	-0,35439	0	0,41937	Counterbore with Nut-17
Shear Force (N)	29,948	9,7754	0	31,503	Counterbore with Nut-18
Axial Force (N)	0	0	20,076	20,076	Counterbore with Nut-18
Bending moment (N.m)	0,096266	-0,32676	0	0,34064	Counterbore with Nut-18
Shear Force (N)	30,892	6,2657	0	31,521	Counterbore with Nut-19
Axial Force (N)	0	0	7,1355	7,1355	Counterbore with Nut-19
Bending moment (N.m)	0,069972	-0,33726	0	0,34444	Counterbore with Nut-19
Shear Force (N)	46,386	4,4837	0	46,602	Counterbore with Nut-20
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-20

Bending moment (N.m)	0,041016	-0,49014	0	0,49186	Counterbore with Nut-20
Shear Force (N)	29,371	-14,404	0	32,713	Counterbore with Nut-21
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-21
Bending moment (N.m)	-0,15325	-0,32147	0	0,35613	Counterbore with Nut-21
Shear Force (N)	42,352	-23,412	0	48,393	Counterbore with Nut-22
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-22
Bending moment (N.m)	-0,23988	-0,45035	0	0,51025	Counterbore with Nut-22
Shear Force (N)	19,053	-14,035	0	23,664	Counterbore with Nut-23
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-23
Bending moment (N.m)	-0,14953	-0,20322	0	0,2523	Counterbore with Nut-23
Shear Force (N)	21,508	-4,5137	0	21,977	Counterbore with Nut-24
Axial Force (N)	0	0	13,445	13,445	Counterbore with Nut-24
Bending moment (N.m)	-0,044364	-0,23786	0	0,24196	Counterbore with Nut-24

Tipo	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Resultante	Parafuso
Shear Force (N)	-15,724	0	13,213	20,539	Counterbore with Nut-2
Axial Force (N)	0	-23,265	0	23,265	Counterbore with Nut-2
Bending moment (N.m)	0,13615	0	0,17721	0,22347	Counterbore with Nut-2
Shear Force (N)	5,7315	0	33,641	34,126	Counterbore with Nut-3
Axial Force (N)	0	-3,2147	0	3,2147	Counterbore with Nut-3
Bending moment (N.m)	0,35458	0	-0,0571	0,35915	Counterbore with Nut-3
Shear Force (N)	-31,601	0	56,209	64,483	Counterbore with Nut-4
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-4
Bending moment (N.m)	0,58382	0	0,34687	0,67909	Counterbore with Nut-4
Shear Force (N)	-52,473	0	78,521	94,44	Counterbore with Nut-5
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-5
Bending moment (N.m)	0,80817	0	0,54607	0,97536	Counterbore with Nut-5
Shear Force (N)	-56,521	0	-65,492	86,509	Counterbore with Nut-6
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-6
Bending moment (N.m)	-0,68446	0	0,61947	0,92316	Counterbore with Nut-6
Shear Force (N)	-86,692	0	-90,041	124,99	Counterbore with Nut-7
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-7
Bending moment (N.m)	-0,92276	0	0,91469	1,2993	Counterbore with Nut-7
Shear Force (N)	-36,935	0	-14,887	39,822	Counterbore with Nut-8
Axial Force (N)	0	-33,618	0	33,618	Counterbore with Nut-8
Bending moment (N.m)	-0,14878	0	0,41217	0,4382	Counterbore with Nut-8
Shear Force (N)	-15,318	0	-42,488	45,164	Counterbore with Nut-9
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-9
Bending moment (N.m)	-0,453	0	0,16823	0,48323	Counterbore with Nut-9
Shear Force (N)	16,193	0	13,368	20,998	Counterbore with Nut-10
Axial Force (N)	0	-23,594	0	23,594	Counterbore with Nut-10

Bending moment (N.m)	0,13801	0	-0,18298	0,22918	Counterbore with Nut-10
Shear Force (N)	-6,1932	0	33,887	34,448	Counterbore with Nut-11
Axial Force (N)	0	-4,4516	0	4,4516	Counterbore with Nut-11
Bending moment (N.m)	0,35645	0	0,062772	0,36193	Counterbore with Nut-11
Shear Force (N)	30,838	0	60,736	68,116	Counterbore with Nut-12
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-12
Bending moment (N.m)	0,63002	0	-0,33778	0,71486	Counterbore with Nut-12
Shear Force (N)	55,897	0	78,15	96,083	Counterbore with Nut-13
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-13
Bending moment (N.m)	0,79945	0	-0,58652	0,99153	Counterbore with Nut-13
Shear Force (N)	55,164	0	-65,361	85,528	Counterbore with Nut-14
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-14
Bending moment (N.m)	-0,6807	0	-0,60196	0,90868	Counterbore with Nut-14
Shear Force (N)	90,104	0	-88,503	126,3	Counterbore with Nut-15
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-15
Bending moment (N.m)	-0,89849	0	-0,94479	1,3038	Counterbore with Nut-15
Shear Force (N)	35,128	0	-14,11	37,856	Counterbore with Nut-16
Axial Force (N)	0	-32,628	0	32,628	Counterbore with Nut-16
Bending moment (N.m)	-0,13999	0	-0,39015	0,41451	Counterbore with Nut-16
Shear Force (N)	14,832	0	-42,161	44,694	Counterbore with Nut-17
Axial Force (N)	0	0	0	0	Counterbore with Nut-17
Bending moment (N.m)	-0,44637	0	-0,16274	0,47511	Counterbore with Nut-17