



Instituto Politécnico
de Castelo Branco
Escola Superior
de Tecnologia

Projeto e fabrico de um protótipo de uma carapaça para proteção de um drone (tipo quadricóptero) por impressão 3D

André Filipe Andrezo Martins

Orientadores

Doutor Armando Lopes Ramalho

Trabalho de Projeto apresentado à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Licenciado em Engenharia Industrial, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Armando Lopes Ramalho, do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Setembro de 2024

Composição do júri

Presidente do júri

Professor Doutor Armando Lopes Ramalho

Vogais

Professor Doutor Luís Miguel Pedroso de Moura Correia.

Professor Adjunto, Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco

Professor Doutor Paulo Jorge Sequeira Gonçalves

Professor Coordenador, Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Armando Ramalho, pelo seu apoio e disponibilidade incondicionais. A sua orientação e conhecimento foram essenciais para o desenvolvimento deste projeto.

À minha esposa, pelo seu amor, paciência e apoio ao longo deste percurso académico.

Aos colegas com quem partilhei estes anos de estudo, pelas experiências e conhecimentos trocados.

A todos, o meu sincero agradecimento.

Resumo

Este projeto focou-se no desenvolvimento de uma carapaça de drone, passando por três fases.

Utilizando o Autodesk Fusion 360, criou-se um modelo 3D da carapaça do drone com o objetivo de proporcionar proteção máxima aos componentes internos e manter um peso baixo sem comprometer a integridade.

Foi realizada análise de impacto, utilizando Patran/Nastran, as simulações focaram-se em avaliar o impacto das medidas de proteção implementadas, identificar e reforçar pontos fracos. Os resultados desta análise levaram a refinamentos iterativos no design, priorizando sempre a proteção.

A preparação para impressão 3D com Ultimaker Cura focou-se na otimização dos parâmetros de impressão e no ajuste da densidade de preenchimento para maximizar a proteção nas zonas mais vulneráveis oferecendo o melhor equilíbrio entre resistência ao impacto e peso.

Este projeto resultou numa carapaça de drone que prioriza a proteção dos componentes internos, mantendo um peso otimizado.

Palavras chave

Impressão 3D; Elementos Finitos; Modelação 3D; Simulação computacional

Abstract

This project focused on the development of a drone shell, encompassing three distinct phases.

Using Autodesk Fusion 360, a 3D model of the drone shell was created with the primary objective of providing maximum protection to internal components while maintaining low weight without compromising structural integrity.

Using Patran/Nastran, with simulations aimed at evaluating the effectiveness of implemented protective measures and identifying and reinforcing weak points. Results from this analysis led to iterative refinements in the design, always prioritizing protection.

The preparation of the model for 3D printing using Ultimaker Cura, concentrated on optimizing print parameters and adjusting infill density to maximize protection in the most vulnerable areas while offering the best balance between impact resistance and weight.

This project resulted in a drone shell that prioritizes the protection of internal components while maintaining an optimized weight, demonstrating the successful integration of 3D modeling, structural analysis, and additive manufacturing in drone component design.

Keywords

3D printing; Finite Element Analysis; 3D modeling; computer Simulation

Índice geral

Composição do júri.....	III
Agradecimentos.....	V
Resumo.....	VII
Abstract.....	IX
Índice geral	XI
Índice de figuras	XIII
Índice de símbolos	XVI
Lista de tabelas.....	XVIII
Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos.....	XX
1. Introdução	1
1.1 Definição do problema.....	2
2. O que é um drone e breve história.....	3
3. Software utilizado	4
3.1 Autodesk Fusion 360	4
3.2 MSC Patran/ Nastran.....	4
3.3 Ultimaker Cura	5
4. Modelação 3D.....	6
4.1 Design da carapaça.....	6
5. Simulação de impacto em MSC Patran / Nastran	13
5.1 Definições utilizadas	13
5.1.1 Material Tough PLA	13
5.1.2 Definição da força de impacto	15
5.2 Resultados das simulações de impacto	17
5.3 Peso estimado da carapaça	26
6. Preparação para impressão 3D.....	27
7. Conclusão.....	28
8. Referências e Bibliografia	29
9. Anexos.....	30

Índice de figuras

Figura 1 - Drone DJI Flame Wheel F450	6
Figura 2 - Modelo inicial do drone	7
Figura 3 - Modelo do drone após retirar elementos não essenciais	7
Figura 4 - Geometria para encaixe nos braços do drone.....	8
Figura 5 - Base para a criação da carapaça.....	8
Figura 6 - Primeira versão da carapaça (Modelo A).....	9
Figura 7 - Segunda versão do design da carapaça (Modelo B).....	9
Figura 8 - Última iteração da segunda versão (Modelo D)	10
Figura 9 - Comparação das espessuras nas colunas entre a segunda (em cima) e terceira versão (abaixo)	11
Figura 10 - Comparação do interior da carapaça da terceira versão da carapaça (esquerda) e sua iteração (direita)	12
Figura 11 - Comparação do exterior da carapaça da terceira versão da carapaça (esquerda) e sua iteração (direita)	12
Figura 12 - Parâmetros do <i>Tough PLA no Msc Patran</i>	14
Figura 13 - Zona de aplicação das forças de impacto resultantes da queda livre .	17
Figura 14 - Resultados da simulação a 100 metros de altura (Modelo B, Base de dados B_100)	18
Figura 15 - Resultados da simulação a 50 metros de altura (Modelo B, Base de dados B_50).....	18
Figura 16 - Resultados da simulação a 20 metros de altura (Modelo B, Base de dados B_20).....	19
Figura 17 - Resultados da simulação a 100 metros de altura (Modelo D, Base de dados D_100).....	19
Figura 18 - Resultados da simulação a 50 metros de altura (Modelo D, Base de dados D_50).....	20
Figura 19 - Resultados da simulação a 20 metros de altura (Modelo D, Base de dados D_20).....	20
Figura 21 - Resultados da simulação a 100 metros de altura (Modelo E, Base de dados E_100)	21
Figura 20 - Resultados da simulação a 50 metros de altura (Modelo E, base de dados E_50)	21
Figura 22 - Resultados da simulação a 20 metros de altura (Modelo E, base de dados E_20)	22
Figura 23 - Resultados da simulação a 18 metros de altura (Modelo E, base de dados E_18)	22
Figura 24 - Resultados da simulação a 20 metros de altura (Modelo F, base de dados F_20)	23
Figura 25 - Resultados da simulação a 18 metros de altura (Modelo F, base de dados F_18)	23
Figura 26 - Deformação do Modelo F a uma altura de 20 Metros	24

Figura 27 - Deformação do Modelo F a uma altura de 18 Metros24

Figura 28 - Preparação da carapaça para impressão, detalhe das paredes sólidas

.....27

Índice de símbolos

ρ = densidade da substância, kg/m³.

ν = gravidade específica.

ρ_r = densidade do material de referência, kg/m³.

W = trabalho, j.

K = energia cinética, j.

m = massa, kg

g = aceleração gravítica, m/s²

h = altura, m

v = velocidade, m/s

F_{impacto} = Força de impacto, N

Lista de tabelas

Tabela 1 - Resultados do Cálculo das forças de impacto a diferentes alturas	16
Tabela 2 - Deformações do modelo F	25
Tabela 3 - Resumo dos resultados obtidos.....	25
Tabela 4 - Resumo dos pesos de cada modelo simulado	26

Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

ANAC – Autoridade Nacional de Aviação Civil

CAD – *Computer-aided design*

CAM – *Computer-aided manufacturing*

CAE – *Computer-Aided Engineering*

CNC – *Computer Numeric Control*

ERAST – *Environmental Research Aircraft and Sensor Technology*

GPS – *Global Positioning System*

MSC Nastran – MacNeal-Schwendler Corporation **NASA STRuctural Analysis**

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

UAV – *Unmanned aerial vehicle*

UAS – *Unmanned aerial system*

1. Introdução

Os drones têm vindo cada vez mais a revolucionar diversos sectores, graças à sua versatilidade, aplicabilidade a uma ampla gama de funções e capacidade de executar tarefas em diversos ambientes. Consequentemente a importância de os tornar mais seguros, tanto para o seu desempenho como para as pessoas ao seu redor também aumentou.

Este tipo de veículos são cada vez mais fáceis de manipular e com um preço de aquisição cada vez mais baixo, sendo esperado que a sua utilização por particulares, empresas e autoridades públicas aumente nos próximos anos (Custers, B. 2016).

Operar drones em ambientes externos apresenta inúmeros desafios, como condições climáticas adversas, que podem representar riscos tanto para o drone quanto para os seus sensores integrados (Hei TL.; Kulshrestha M.; Randhawa, P.; 2023).

Um dos elementos críticos no design de drones é a sua estrutura externa, que desempenha um papel fundamental na proteção dos componentes internos tal como na preservação da sua integridade.

O presente projeto pretende desenvolver todos o processo de fabrico aditivo por impressão 3D de uma carapaça de proteção de um drone, para oferecer uma solução à proteção dos seus componentes internos, mas de igual forma manter um peso reduzido para que o seu funcionamento não seja comprometido.

No segundo capítulo pretendo identificar um drone e expor toda a literatura relevante no que respeita ao desenvolvimento destes veículos até aos nossos dias, enquanto no terceiro capítulo vou apresentar de uma forma breve os *softwares* utilizados para o desenvolvimento deste projeto.

No quarto capítulo será explicado o método de modelação em 3D do componente e as suas iterações ao longo deste projeto.

No quinto capítulo vou definir e analisar as solicitações e simular o comportamento em serviço através de análise por elementos finitos.

No sexto capítulo explanamos todo o processo de fabrico por impressão 3D,

Por fim, no capítulo sete apresentam-se as conclusões a retirar da elaboração do presente projeto.

1.1 Definição do problema

Foi proposto o desenvolvimento de uma carapaça de proteção para um drone utilizando tecnologia de fabrico aditivo, especificamente impressão 3D. O âmbito do projeto engloba três fases:

- i. Numa primeira fase a criação do modelo 3D da carapaça;
- ii. A segunda fase foca-se na simulação do comportamento em serviço através de análise por elementos finitos;
- iii. Na última fase a preparação para impressão 3D.

O objetivo principal é criar uma carapaça de proteção que proteja os componentes de um drone, de modo que esta seja otimizada em termos de desempenho mecânico, aproveitando as vantagens da impressão 3D. Este processo permitirá uma abordagem iterativa ao desenho, possibilitando ajustes rápidos e eficientes com base nos resultados das simulações e testes.

O projeto abrange todo o ciclo de desenvolvimento, desde a conceção inicial até à produção do protótipo final, integrando técnicas de modelação 3D, análise estrutural e fabrico aditivo. Esta abordagem permite que a carapaça resultante seja funcional e resistente, e ao mesmo tempo otimizada para produção através de impressão 3D.

2. O que é um drone e breve história

2.1 Definição

De acordo com a ANAC, drone é o termo coloquial utilizado para referir um tipo de *sistema de aeronave não tripulada*, acompanhada do equipamento para controlar remotamente.

Os drones por seu turno, podem dividir-se em duas categorias: os que são comandados remotamente por um piloto humano e os que são autónomos, não requerendo a intervenção de um piloto na sua gestão de voo, seguindo instruções previamente programadas.

Na terminologia militar, estes dispositivos são designados como *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) ou, de forma mais abrangente, como *Unmanned Aircraft System* (UAS), englobando todo o sistema desde o operador até à própria aeronave (DOD Dictionary of Military and Associated Terms, 2010).

2.2 Breve História

O primeiro uso militar ocorreu em 1849, quando a Áustria utilizou balões não tripulados carregados de explosivos para bombardear Veneza. (Tenente-general Alfredo Cruz, 2020)

As primeiras aplicações não militares surgiram na década de 80, com a utilização de drones para medições meteorológicas e fotografia aérea. (Fahlstrom & Gleason, 2012)

O desenvolvimento dos drones continuou ao longo do século XX, com um salto significativo nos anos 90 através do projeto ERAST da NASA. Este projeto focou-se em voos de longa duração a grandes altitudes, resultando em modelos como o Helios, Proteus e Altus, utilizados principalmente para estudos ambientais. (Awange, 2017)

Atualmente, os drones são utilizados numa variedade de aplicações, incluindo monitorização de fronteiras, operações de busca e salvamento, segurança pública, inspeções industriais, mapeamento e agricultura. (Finn & Wright, 2012)

Em Portugal foi publicado em 2016 o Regulamento n.º 1093/2016, diploma emitido pela ANAC que aprova as condições de operação aplicáveis à utilização do espaço aéreo pelos sistemas de aeronaves civis pilotadas remotamente («Drones»).

Esta evolução demonstra como os drones passaram de uma tecnologia primariamente militar para uma ferramenta versátil com amplas aplicações civis e científicas, adaptando-se às necessidades da sociedade moderna e do setor empresarial.

3. Software utilizado

3.1 Autodesk Fusion 360

O *Autodesk Fusion 360* é uma plataforma de software baseada na *cloud* que integra ferramentas de desenho assistido por computador (CAD), fabrico assistido por computador (CAM) e engenharia assistida por computador (CAE) num único ambiente de desenvolvimento de produto.

Esta solução abrangente permite aos utilizadores realizar modelação 3D, simulação, colaboração e fabrico numa única plataforma.

Desenvolvido pela *Autodesk*, o *Fusion 360* oferece uma abordagem unificada ao processo de design e engenharia, permitindo criar, testar e fabricar designs inovadores de forma eficiente. A plataforma suporta várias disciplinas, incluindo design industrial, engenharia mecânica, design de produtos e fabrico.

As principais características do *Fusion 360* incluem:

- Modelação 3D paramétrica e direta
- Renderização e visualização avançadas
- Simulação e análise de elementos finitos
- Geração de percursos de ferramentas para CNC e impressão 3D
- Gestão de dados e colaboração em equipa
- Integração com outras ferramentas da *Autodesk* e aplicações de terceiros.

3.2 MSC Patran/ Nastran

O *MSC Patran* é um software de pré e pós-processamento para análise de elementos finitos. Serve como interface gráfica para a criação de modelos, definição de propriedades de materiais, aplicação de cargas e condições de fronteira, e visualização de resultados. As suas principais funcionalidades incluem:

- Modelação geométrica e importação de modelos CAD;
- Geração de malhas de elementos finitos;
- Definição de propriedades de materiais e elementos;
- Aplicação de cargas e condições de fronteira;
- Visualização e interpretação de resultados.

O *MSC Nastran* (acrónimo de *NASA STRuctural ANalysis*) é um solucionador de elementos finitos, conhecido pela sua precisão e eficiência em análises estruturais. Oferece uma ampla gama de capacidades analíticas, incluindo:

- Análise estática linear e não linear
- Análise dinâmica
- Análise de transferência de calor
- Otimização estrutural
- Análise de fadiga e fratura

Juntos, o *Patran* e o *Nastran* formam uma solução integrada para análise estrutural, permitindo realizar simulações complexas e obter *insights* valiosos sobre o comportamento de estruturas e componentes sob várias condições de carga.

Estes programas são amplamente reconhecidos pela sua fiabilidade e precisão, sendo utilizados em projetos nas indústrias aeroespacial, automóvel, naval e de energia, entre outras.

3.3 Ultimaker Cura

Ultimaker Cura é um software *open-source* de preparação para impressão 3D, desenvolvido pela *Ultimaker*, este programa é amplamente utilizado na comunidade de fabrico aditivo devido à sua versatilidade e facilidade de uso.

O *Ultimaker Cura* funciona como um *slicer*, convertendo modelos 3D digitais em instruções específicas (código G) que as impressoras 3D podem interpretar e executar. As suas principais funcionalidades incluem:

- Importação de ficheiros 3D em vários formatos (STL, OBJ, 3MF, etc.);
- Visualização e manipulação de modelos 3D;
- Configuração de parâmetros de impressão (altura da camada, velocidade, temperatura, etc.);
- Geração de suportes e estruturas de adesão;
- Previsão do tempo de impressão e consumo de material;
- Exportação de código G para impressoras 3D.

4. Modelação 3D

4.1 Design da carapaça

Antes de dar início ao design da carapaça tomei a decisão de optar por um design mais funcional em que o primeiro objetivo fosse a proteção, em vez de escolher um design mais aerodinâmico.

Após observar o drone modelo DJI F450 para o qual ia desenhar a carapaça, representado pela figura 1 e que se encontra no laboratório de conceção e projeto da ESTCB, notei que já tinha alguns danos, mantive a minha decisão de optar pela vertente de proteção, já que este aparentava ter sido pilotado por pessoas com menos experiência.



Figura 1- Drone DJI Flame Wheel F450

Decidi seguir pela rota do design mais funcional, assim em caso de queda, não só esta carapaça teria a proteção como primeiro objetivo como seria facilmente substituída em caso de quebra.

Inicialmente procurei pelos componentes em falta do drone, neste caso uma perna de aterragem e um braço para o motor, encontrei um modelo deste drone em 3D no site *grabcad.com*, (ver referências bibliográficas para endereço completo), o que me permitiu ter uma excelente base para a criação da carapaça representado na figura 2.

Com recurso a um paquímetro tirei algumas medidas que me permitiram dar início ao design da carapaça, neste caso tirei as dimensões da placa superior e dos braços onde estão acoplados os motores.



Figura 2 - Modelo inicial do drone

Após verificar que as medidas eram bastante semelhantes (dando espaço para erros de medição), decidi utilizar este modelo como base para a criação da carapaça.

Retirei alguns elementos não essenciais como a câmara, cablagem e controladores visto que não eram essenciais para o desenvolvimento da carapaça e o resultado pode ver-se na figura 3 representada abaixo.

Desta maneira consegui poupar recursos ao modelar a carapaça, mantendo apenas a estrutura e as hélices que poderiam embater na carapaça.

Após a retirar os equipamentos não essenciais do modelo fiquei com a seguinte estrutura do drone:

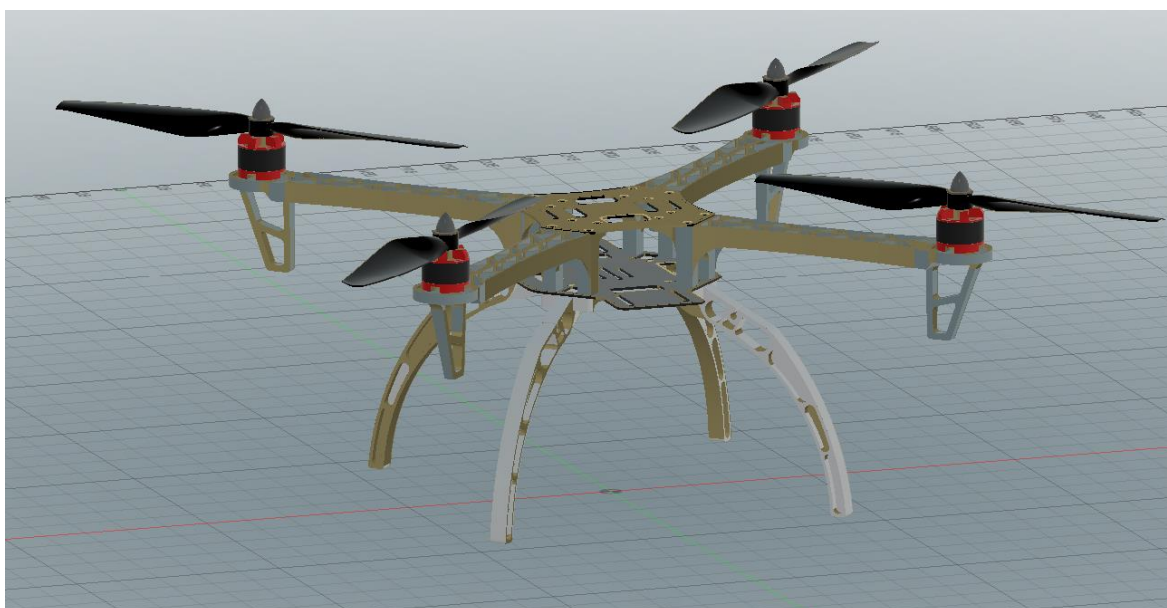


Figura 3 - Modelo do drone após retirar elementos não essenciais

Comecei por decidir quais os pontos de fixação da carapaça. Numa fase embrionária a fixação era para ser feita nos braços do drone conforme figura 4, com um sistema de encaixe nos furos já existentes. Mas devido à geometria complexa com diferentes ângulos optei por uma solução mais simples.

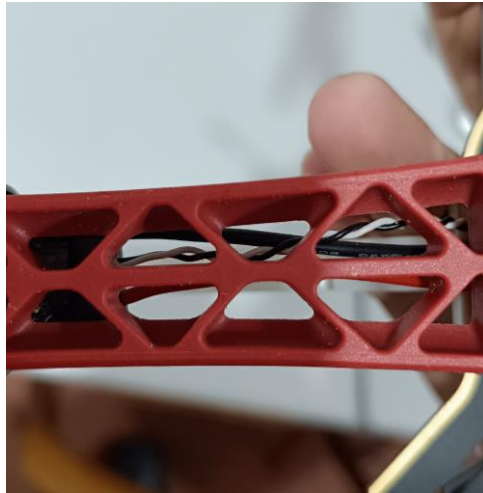


Figura 4 - Geometria para encaixe nos braços do drone

Utilizando os furos já existentes para a fixação dos braços, poderia usar estes para fixar a carapaça.

Encontrei um modelo no site *printables.com*, (ver referências bibliográficas para endereço completo), que me serviu de inspiração para a construção da carapaça, uma estrutura simples com quatro colunas representado na figura 5 abaixo.

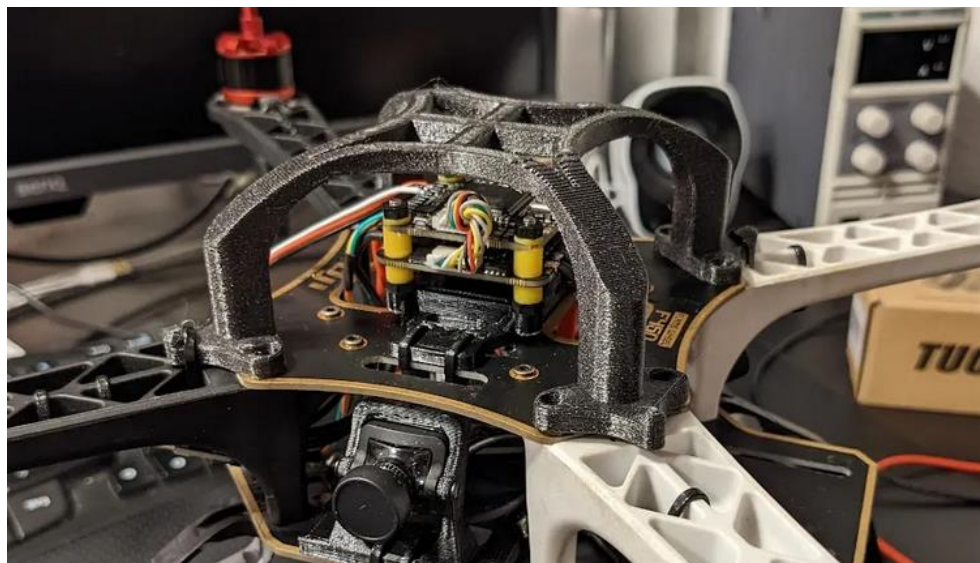


Figura 5 - Base para a criação da carapaça

Sendo o design desta carapaça um processo iterativo, este foi o primeiro design que criei (Modelo A) representado na figura 6 com a imagem à esquerda sendo o topo e a imagem à direita o interior da carapaça;

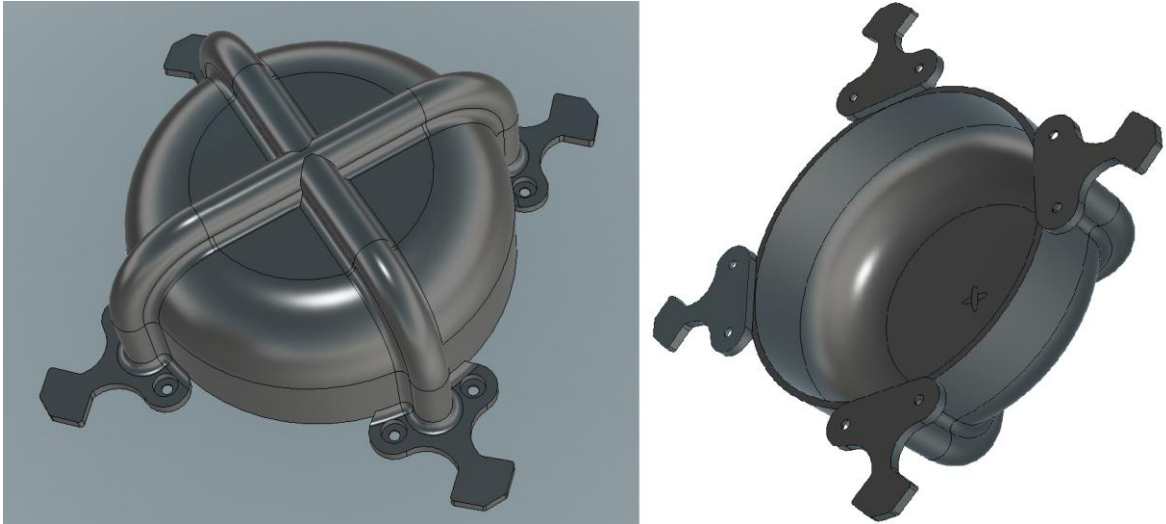


Figura 6 - Primeira versão da carapaça (Modelo A)

Este modelo em comparação ao design de inspiração tinha além de quatro colunas de proteção principais, a parede com 2 milímetros de espessura a toda a volta para garantir que em caso de queda, se algum componente se movesse do seu lugar que ficaria dentro desta carapaça.

No primeiro modelo criado ainda não tinha definido se a fixação ia ser exclusivamente através dos furos já existentes ou se também em conjunto com alguma fixação nos braços. Este primeiro modelo apenas tinha em conta a proteção, sendo as colunas maciças algo que viria a ser mudado nas versões seguintes para aliviar o peso da carapaça.

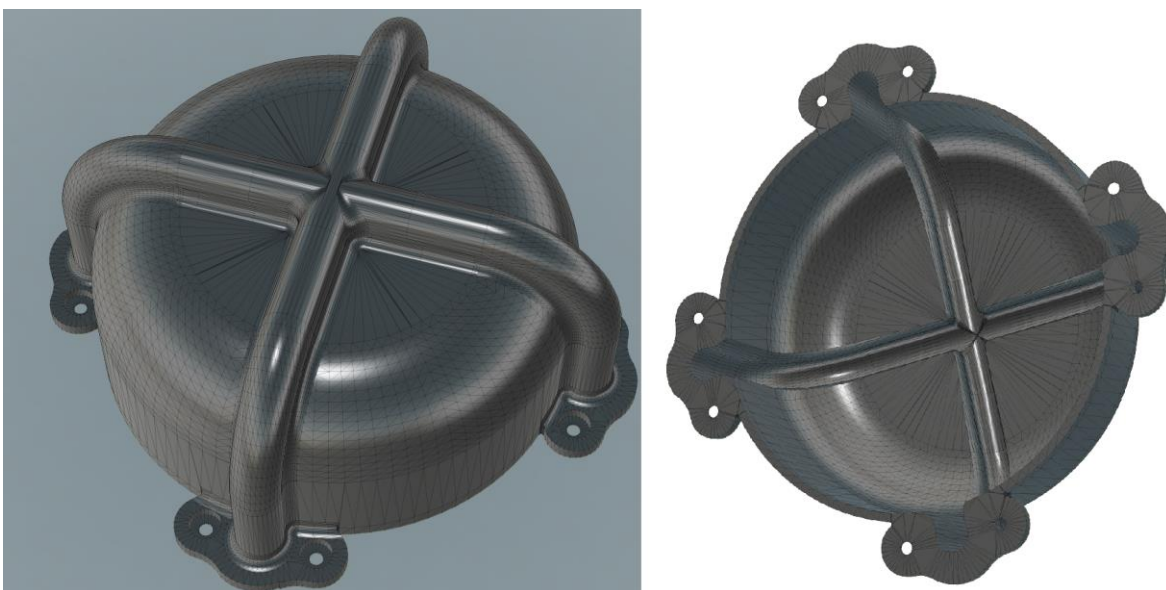


Figura 7 - Segunda versão do design da carapaça (Modelo B)

Após o feedback do meu orientador de projeto, decidimos então fazer algumas alterações.

Estas alterações na carapaça referidas ao longo deste capítulo foram efetuadas com base nas simulações referidas no capítulo seguinte.

Nesta segunda versão (Modelo B), representado acima pela figura 7, a alteração mais notória foi ter-se retirado o interior das colunas para reduzir tanto o peso carregado pelo drone como o material utilizado na impressão. As colunas ocas ficaram com uma espessura de parede de 1 mm.

Foram criados também alguns chanfros no topo da carapaça para reduzir o número de arestas agudas para reduzir os pontos de stress na carapaça e para que o impacto possa ser absorvido com mais facilidade pela carapaça.

Ao finalizar esta versão iniciaram-se as simulações de impacto no software *MSC Patran / Nastran* que irá ser discutido mais adiante.

Com o decorrer das simulações de impacto foram surgindo algumas alterações mínimas.

Na iteração seguinte da segunda aumentaram-se os chanfros no topo da carapaça. (Modelo C), versão que não foi utilizada para simulações.

Existiu ainda uma terceira iteração (Modelo D) representado na figura 8, abaixo, onde se criou um furo para a passagem da antena de GPS do drone. Como esta versão e a anterior foram num espaço de tempo muito curto, inutilizou-se a versão anterior para simulações de impacto.

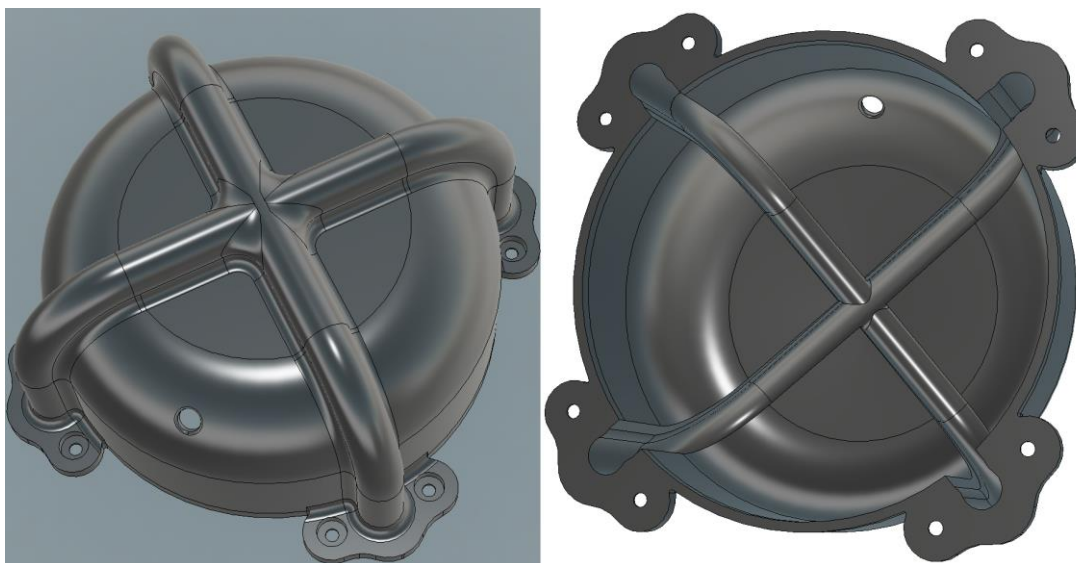


Figura 8 - Última iteração da segunda versão (Modelo D)

Após as simulações realizadas com esta segunda versão e suas iterações, (à exceção da última, que como referido anteriormente não foi utilizada para simulação), criei uma nova versão em que se duplicou a espessura da casca (Modelo E), tendo esta agora 4mm de espessura. Esta comparação entre versões pode verificar-se na figura 9 abaixo, onde o interior das colunas também foi refeito tendo estas agora uma espessura de 3,2 mm.

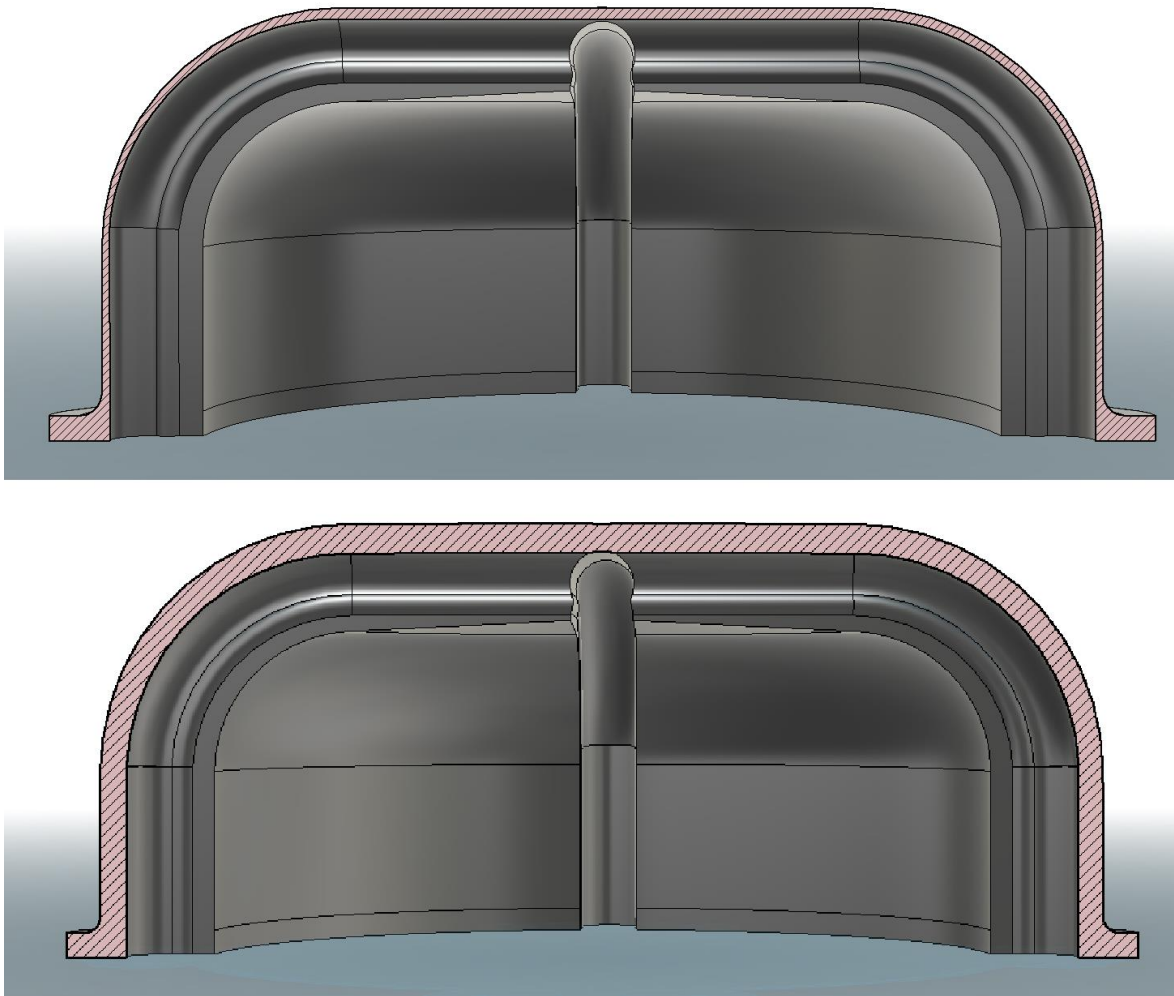


Figura 9 - Comparação das espessuras nas colunas entre a segunda (em cima) e terceira versão (abaixo)

Após correr as simulações de impacto, que vão ser explicadas no capítulo seguinte, foi feita uma última versão (Modelo F) onde foram reduzidas ao máximo as arestas vivas, especialmente no interior da carapaça.

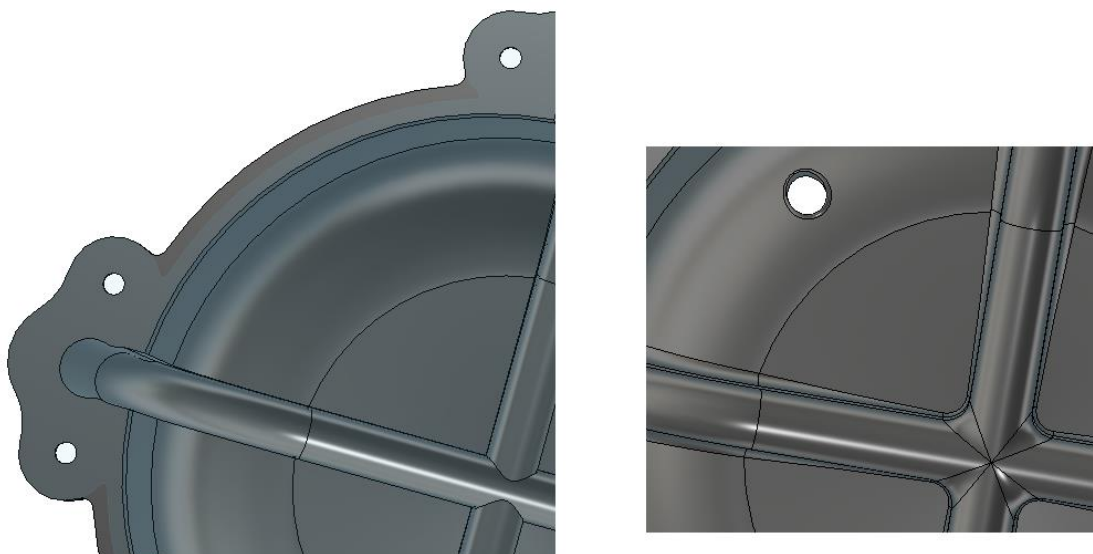


Figura 10 - Comparação do interior da carapaça da terceira versão da carapaça (esquerda) e sua iteração (direita)

Foi refeito o interior das colunas e tentou-se chanfrar o máximo possível, representado na figura 10, e foi reposicionado o furo para a antena do GPS, agora completamente na vertical como representado na figura 11.

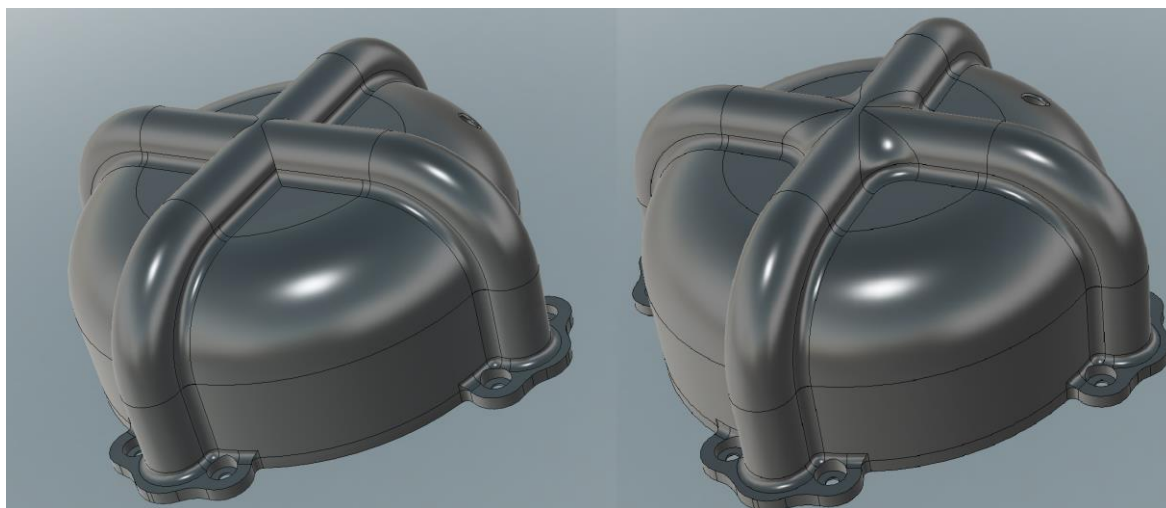


Figura 11 - Comparação do exterior da carapaça da terceira versão da carapaça (esquerda) e sua iteração (direita)

Como se pode verificar na figura 11 os chanfros modificados na parte exterior da carapaça são muito mais acentuados para permitir uma melhor distribuição do impacto.

5. Simulação de impacto em MSC Patran / Nastran

5.1 Definições utilizadas

5.1.1 Material Tough PLA

Para realizar as simulações são necessários vários parâmetros, relacionados com o material da carapaça, a força de impacto e pontos de fixação.

Para a simulação e fabrico, foi utilizado o material *Tough PLA* da marca *Ultimaker*, este tem características próprias que tiverem que ser tidas em conta para que os resultados da nossa simulação sejam mais exatos.

Os parâmetros necessários foram retirados de uma folha técnica do material da marca fornecida pelo meu orientador de projeto.

Os parâmetros necessários para a realização das simulações foram, o módulo de elasticidade, o coeficiente de *Poisson* e a densidade do material.

O módulo elástico tirou-se diretamente da folha de especificações do material, o valor foi convertido de MPa para GPa;

$$1820 \text{ MPa} = 1820 \times 10^{-3} \text{ GPa}$$

$$1,820 \text{ GPa}$$

O coeficiente de *Poisson* também já vinha descrito na folha de especificações utilizada. Este valor é de utilização direta.

A densidade foi retirada através da gravidade específica do material, da ficha de características do *Tough PLA*, esta tem um valor de 1.22. Este valor foi obtido através da Norma ISO 1183, que indica como obter a densidade de um material plástico não celular.

Para o Cálculo da densidade utiliza-se a seguinte fórmula:

$$\rho = \nu \times \rho_r \quad (1)$$

Em que:

ρ é densidade da substância

ν é a gravidade específica

ρ_r é a densidade do material de referência

Assumi água destilada pois segundo a norma não temos maneira de saber qual o líquido utilizado para comparação. Verifiquei a densidade específica da água a 23°C consultando as tabelas da densidade específica em que:

$$0.99753 \text{ g/cm}^3$$

Aplicando a fórmula do cálculo da densidade apresentada temos:

$$\begin{aligned}\rho &= v \times \rho_r \\ \rho &= 1.22 \times (9.9753 \times 10^{-4}) \\ \rho &= 1.2169866 \text{ g/cm}^3\end{aligned}\tag{2}$$

Convertendo para g/mm^3 $\rho = 1.2169866 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^3$

Após o cálculo da densidade do *Tough PLA* temos todos os parâmetros necessários para definir o material no *Msc Patran* e na figura 12 abaixo podemos verificar como foram introduzidos no software *Msc Patran*.

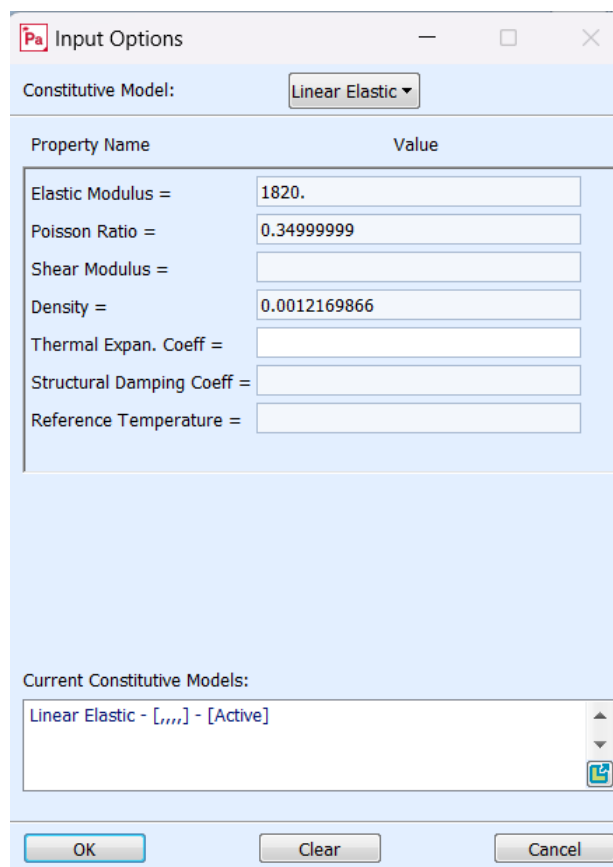


Figura 12 - Parâmetros do *Tough PLA* no *Msc Patran*

Este material depois foi aplicado a toda a carapaça.

5.1.2 Definição da força de impacto

Após inserir os parâmetros do PLA e aplicá-los à carapaça foi necessário definir a nossa força de impacto. A força de impacto foi calculada para diferentes alturas.

A força de impacto é calculada através do teorema do trabalho-energia em que:

$$W = \Delta K \quad (3)$$

Em que o trabalho W é igual à variação da energia cinética (K) de um corpo. A variação da energia cinética é a diferença entre a energia cinética inicial e final de um corpo.

$$\Delta K = K_f - K_i \quad (4)$$

A força cinética é calculada por:

$$\Delta K = \frac{1}{2}mv_{final}^2 - \frac{1}{2}mv_{inicial}^2 \quad (5)$$

Quando um objeto cai a sua energia potencial gravítica é convertida em energia cinética.

$$\text{Energia potencial gravítica} = \text{Energia cinética} \quad (6)$$

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad (7)$$

A velocidade antes do impacto é definida por:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (8)$$

Importante notar que a velocidade inicial é de zero, foi assumido que o drone estaria estático à altura da queda.

É necessário de ter em conta o deslocamento após o impacto para calcularmos a força de impacto. Como esta variável pode depender de demais variáveis, como por exemplo o tipo de solo, ângulo de impacto, deformação da carapaça e do solo, e assim por diante. Foi definido que este deslocamento para todas as simulações foi de 10 cm pois é o valor padrão utilizado para solo não agregado.

Foi desprezada a resistência aerodinâmica. Desta forma está-se a trabalhar do lado da segurança pois a resistência aerodinâmica diminuiria a força de impacto obtida.

Para o cálculo da força de impacto temos de adicionar à altura o deslocamento.

$$\text{Força de impacto} * \text{deslocamento} = \Delta \text{Energia cinética} \quad (9)$$

$$F_{\text{impacto}} = \frac{mv^2}{2.d} \text{ ou } F_{\text{impacto}} = \frac{mgh}{d} \quad (10)$$

Para o peso do drone considerei o pior caso possível, verifiquei as especificações do drone e utilizei o peso máximo de descolagem como referência, 1,6 quilogramas.

Inicialmente foram feitas simulações para três alturas, 100, 50 e 20 metros de altura e mais tarde a 18 metros de altura.

Calculando para 100 metros de altura temos:

$$v = \sqrt{2gh}$$

$$v = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 100} (=) v = 44,27 \frac{m}{s} \quad (11)$$

$$F_{\text{impacto}} = \frac{mv^2}{2.d}$$

$$F_{\text{impacto } 100mts} = \frac{1,6 \cdot 44,27^2}{2 \cdot 0,1} (=) \quad (12)$$

$$(=) F_{\text{impacto } 100mts} = 15680 \text{ N}$$

Tabela 1 - Resultados do Cálculo das forças de impacto a diferentes alturas

Cálculo da Força de Impacto	
100 metros de altura	15680 N
50 metros de altura	7840 N
20 metros de altura	3136 N
18 metros de altura	2822,4 N

Na tabela 1 acima estão os resultados do cálculo da força de impacto para cada altura a que foram realizadas as simulações.

Tendo os valores para cada altura calculada podes introduzir no Msc Patran para realizar a simulação. A simulação impacto foi sempre feito no topo da carapaça na zona das colunas como representado na figura 13, abaixo.

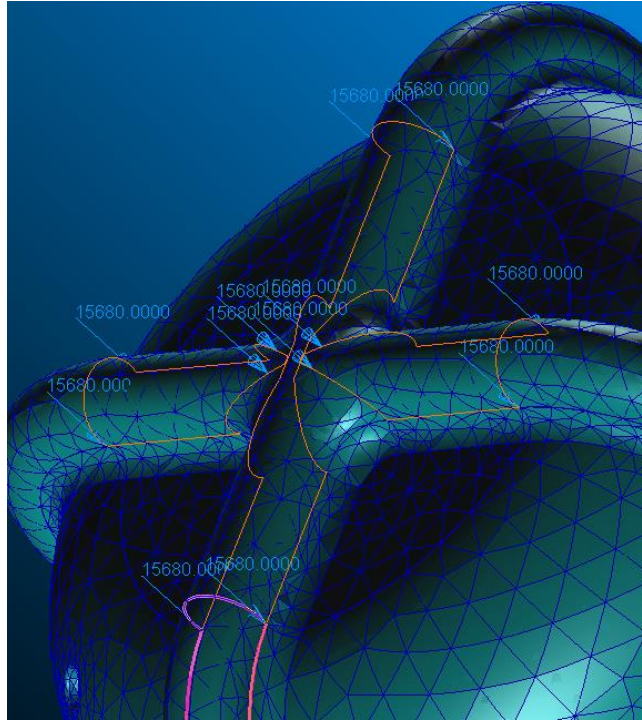


Figura 13 - Zona de aplicação das forças de impacto resultantes da queda livre

Utilizou-se uma malha o mais fina possível para mapear os nós da carapaça, não se utilizou o valor padrão, por iteração utilizou-se uma malha o mais fina possível tendo em conta as limitações do software para versão de estudante. Durante este processo foi verificada a convergência da malha.

5.2 Resultados das simulações de impacto

As primeiras simulações foram realizadas na segunda iteração da primeira versão (Modelo B), foram feitas as simulações para as alturas de 100, 50 e 20 metros de altura; nas figuras 14 a 25, do lado esquerdo está representado o lado exterior da carapaça e do lado direito o interior.

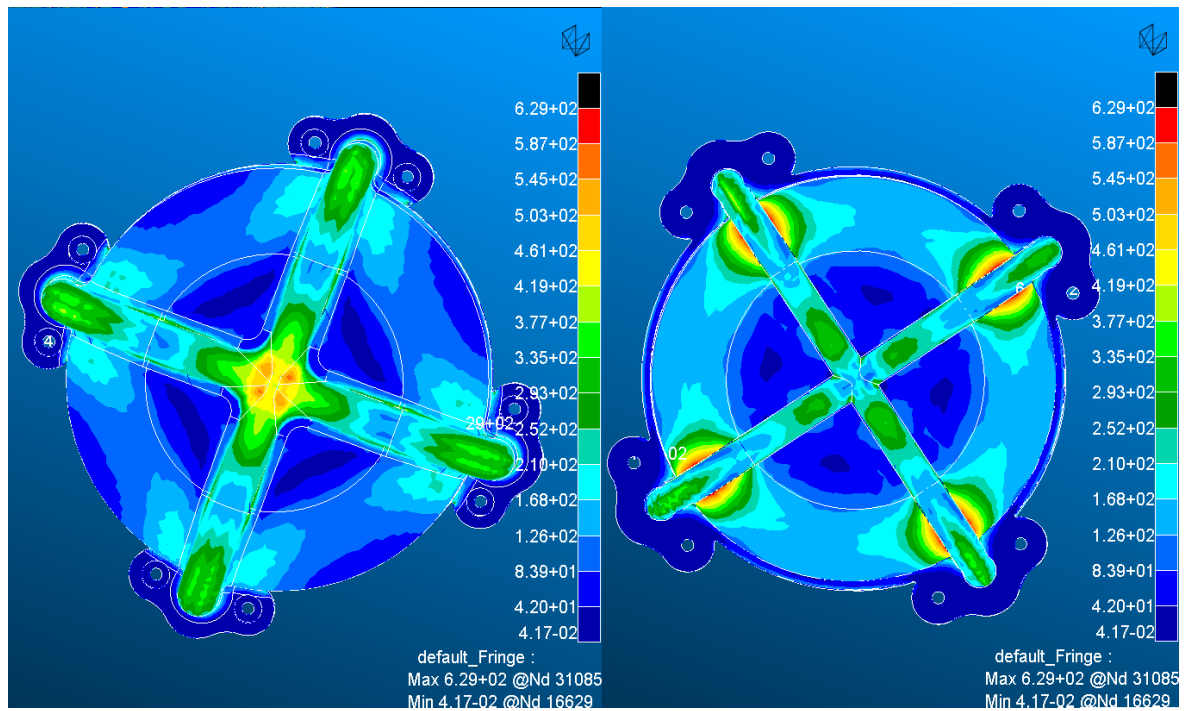


Figura 14 - Resultados da simulação a 100 metros de altura (Modelo B, Base de dados B_100)

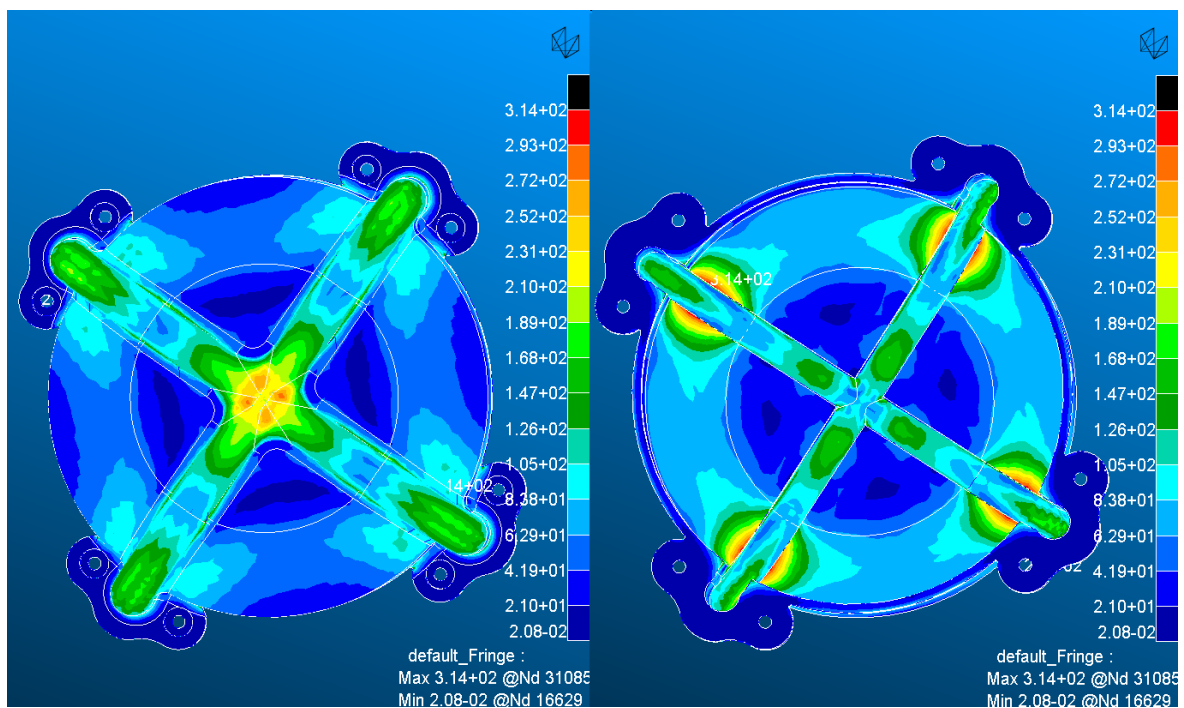


Figura 15 - Resultados da simulação a 50 metros de altura (Modelo B, Base de dados B_50)

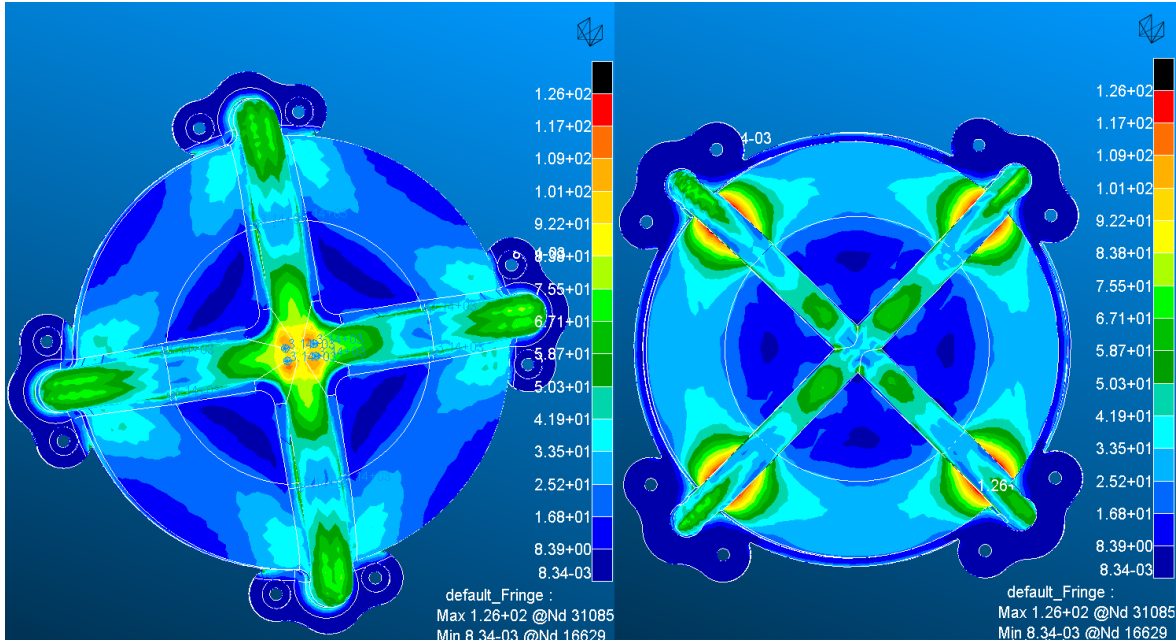


Figura 16 - Resultados da simulação a 20 metros de altura (Modelo B, Base de dados B_20)

Após as primeiras simulações representadas nas figuras 14 a 16, verificou-se que o ponto de maior tensão era na parte interior das colunas, com as modificações à carapaça tentou-se reduzir estas tensões para um valor aceitável.

Resultados das simulações da terceira iteração da primeira versão (Modelo D), representados abaixo pelas figuras 17 á figura 19.

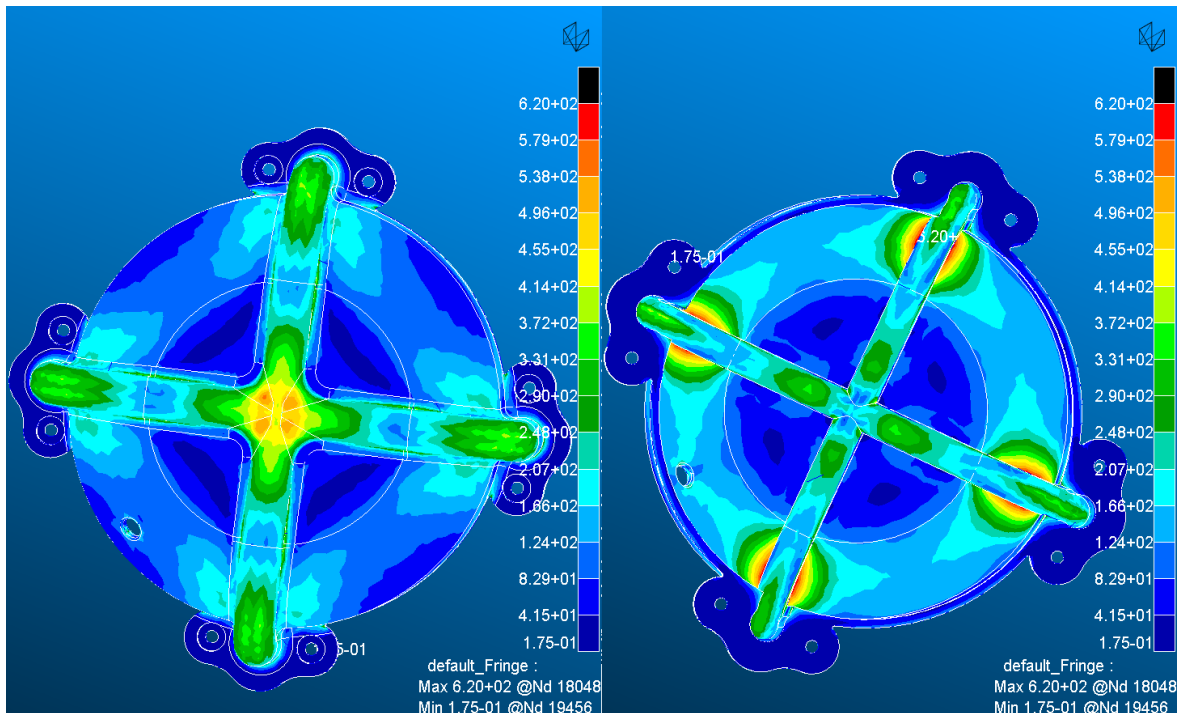


Figura 17 - Resultados da simulação a 100 metros de altura (Modelo D, Base de dados D_100)

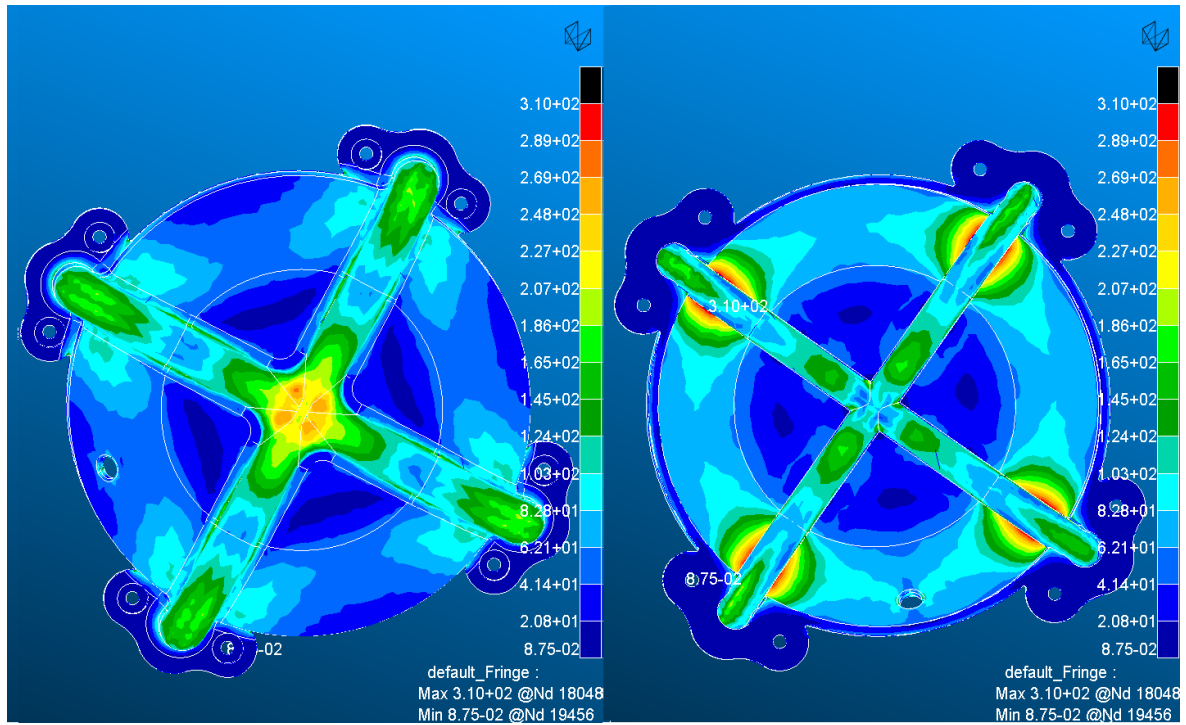


Figura 18 - Resultados da simulação a 50 metros de altura (Modelo D, Base de dados D_50)

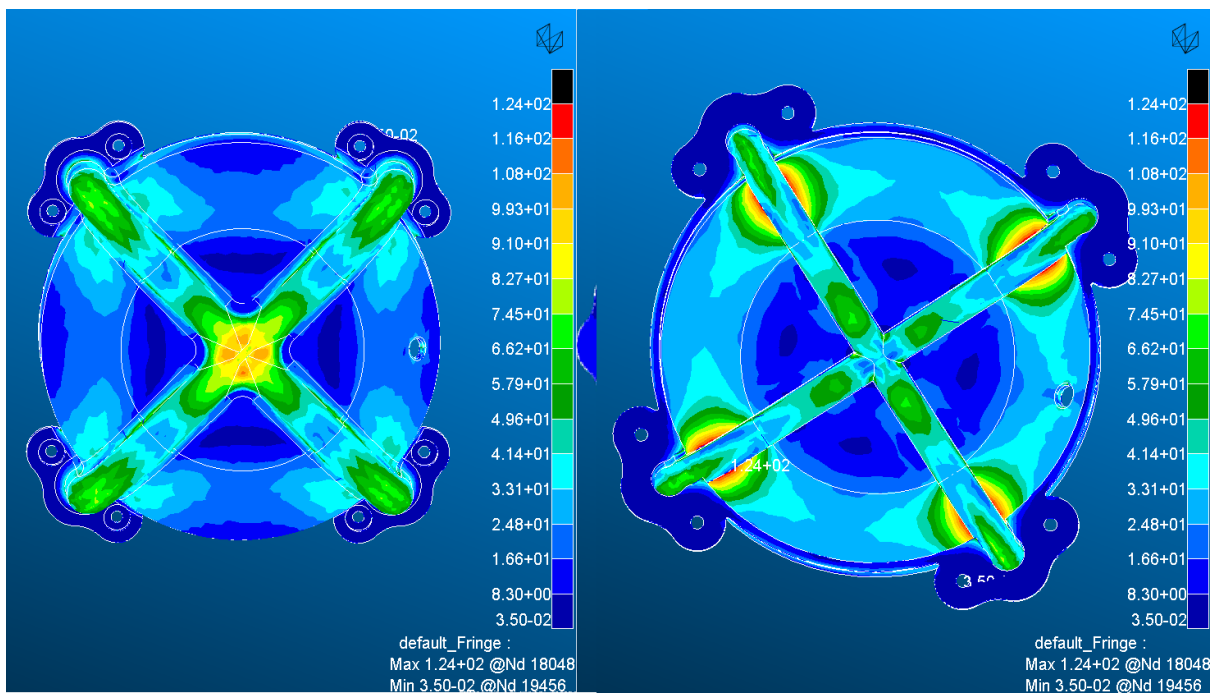


Figura 19 - Resultados da simulação a 20 metros de altura (Modelo D, Base de dados D_20)

Resultados das simulações da primeira iteração da segunda versão (Modelo E), representados pelas figuras 20 à figura 23.

Como com os reforços adicionais as tensões máximas excediam as tensões de cedência do *Tough PLA* foi também simulado a queda a 18 metros de altura.

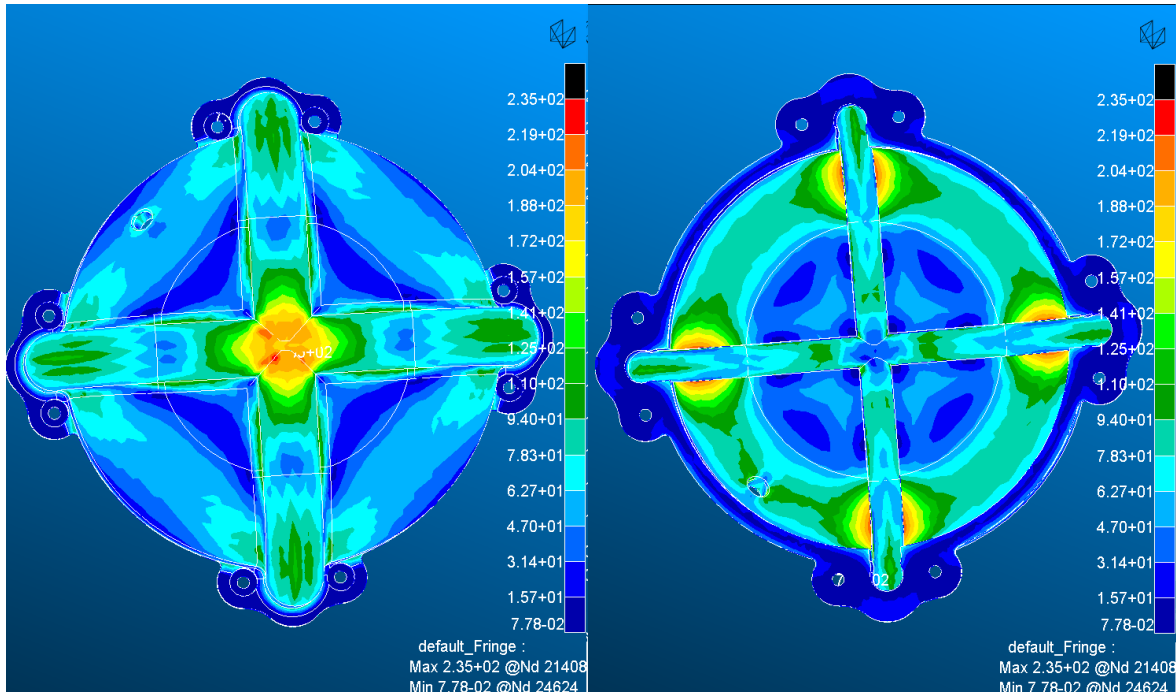


Figura 20 - Resultados da simulação a 100 metros de altura (Modelo E, Base de dados E_100)

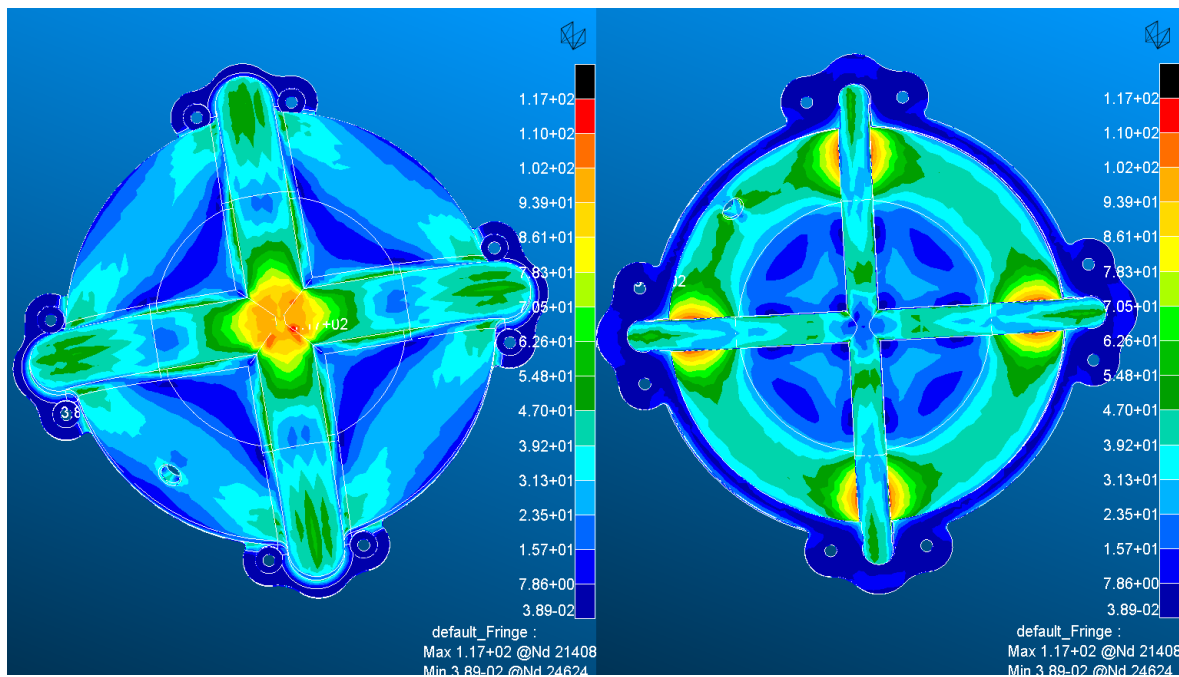


Figura 21 - Resultados da simulação a 50 metros de altura (Modelo E, base de dados E_50)

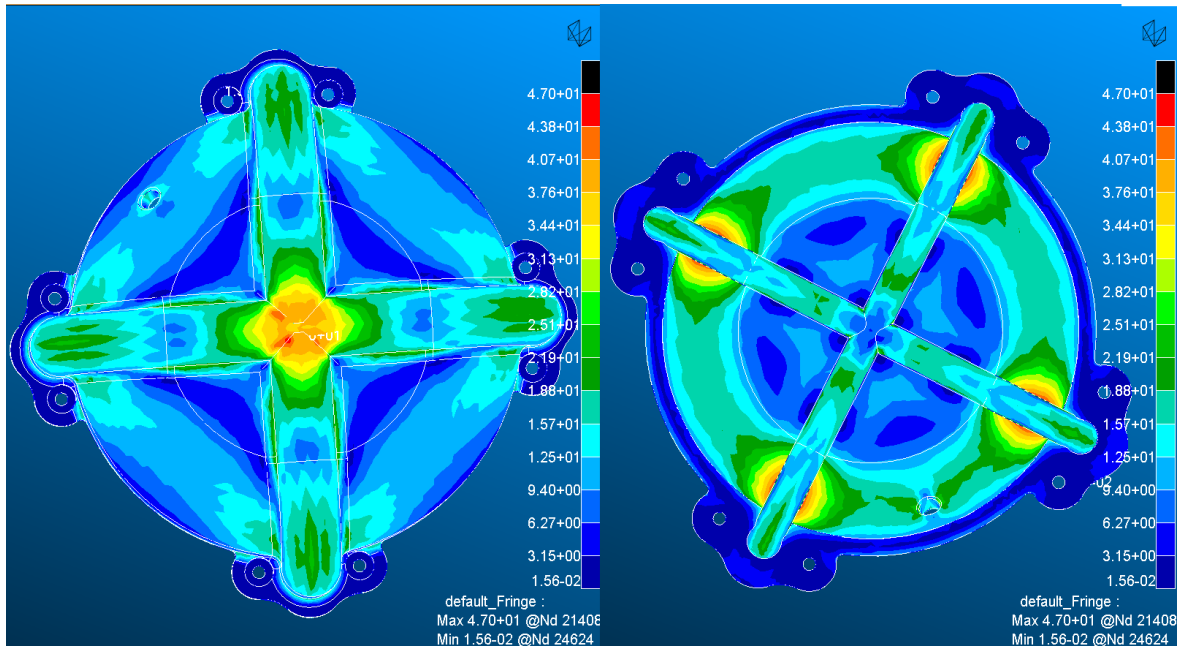


Figura 22 - Resultados da simulação a 20 metros de altura (Modelo E, base de dados E_20)

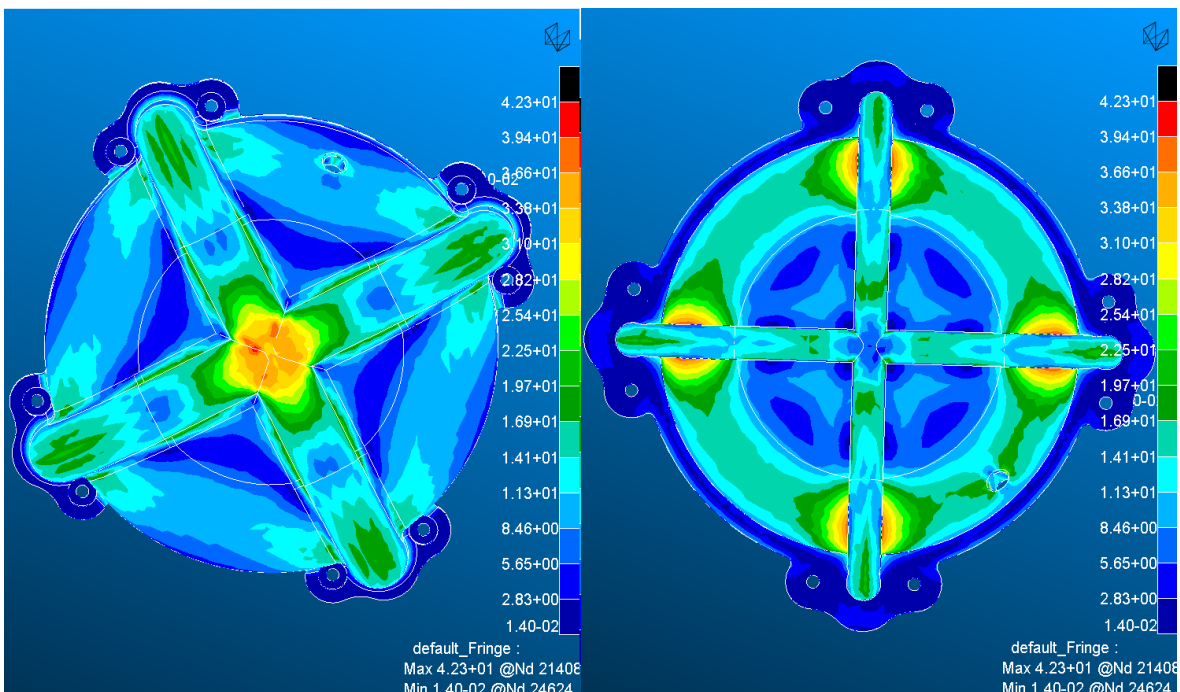


Figura 23 - Resultados da simulação a 18 metros de altura (Modelo E, base de dados E_18)

Resultados das simulações da segunda iteração da segunda versão (Modelo F), representados pelas figuras 24 e 25, como se tem verificado nos resultados anteriores, as simulações acima de 20 metros de altura excediam sempre a resistência do material da carapaça. Neste modelo foram só feitas simulações de queda a 18 e a 20 metros de altura.

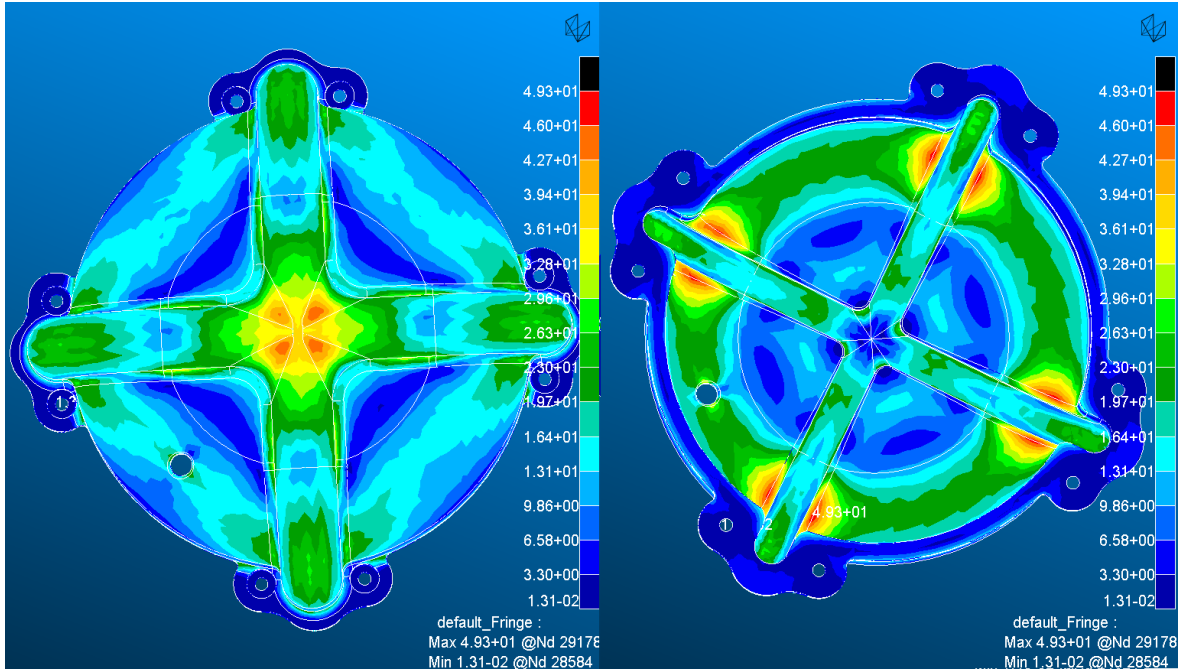


Figura 24 - Resultados da simulação a 20 metros de altura (Modelo F, base de dados F_20)

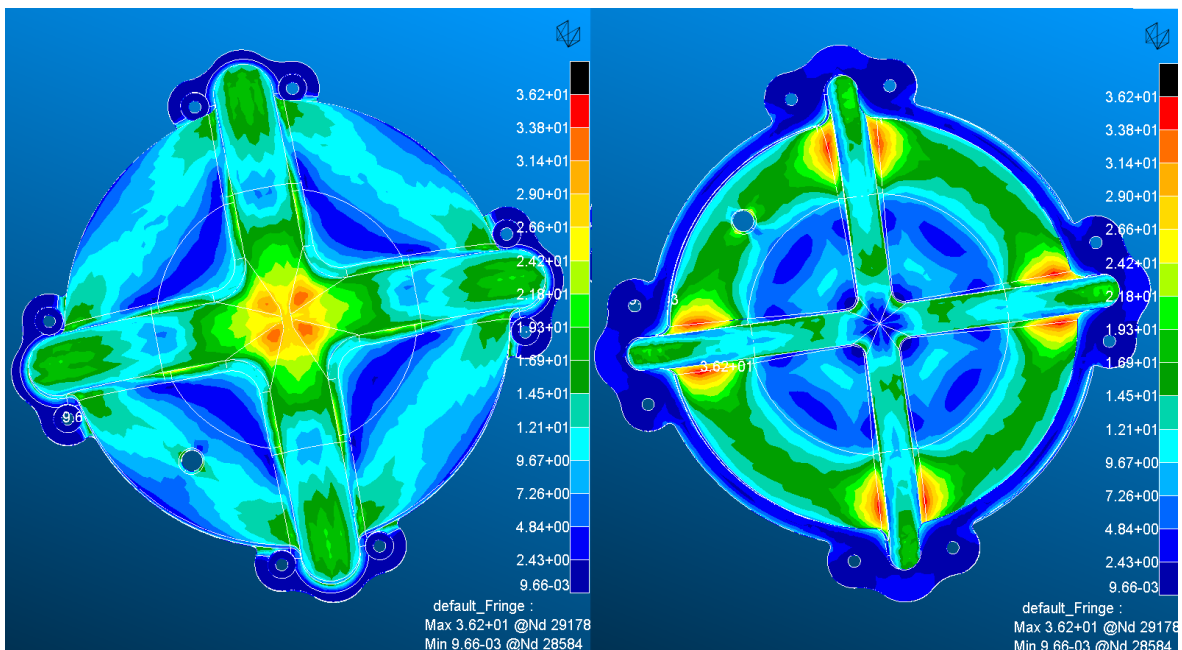


Figura 25 - Resultados da simulação a 18 metros de altura (Modelo F, base de dados F_18)

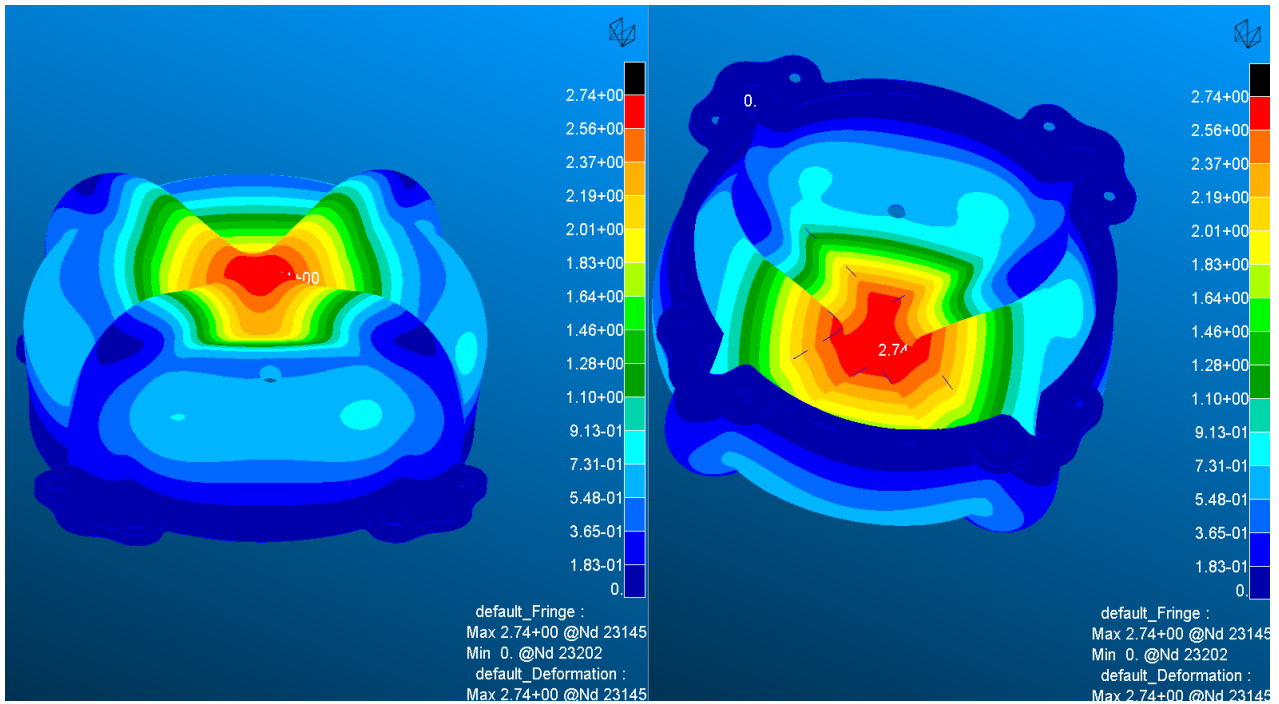


Figura 26 - Deformação do Modelo F a uma altura de 20 Metros

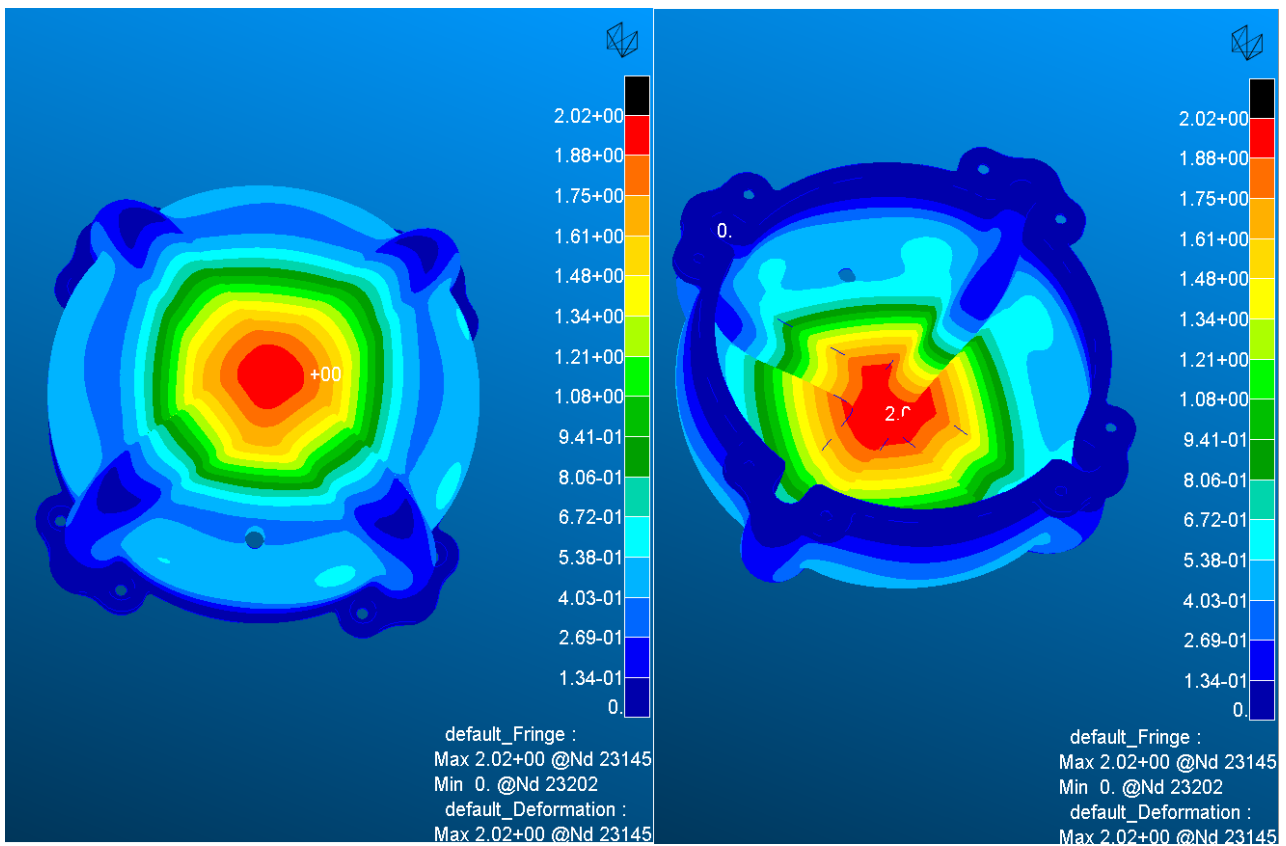


Figura 27 - Deformação do Modelo F a uma altura de 18 Metros

Nas figuras 26 e 27 acima, podemos ver as deformações, em milímetros para as quedas a 20 metros, com um máximo de 2,74 milímetros e a 18 metros, com um máximo de 2.02 milímetros, representados na tabela 2 abaixo.

Tabela 2- Deformações do modelo F

Deformações do modelo F em milímetros		
Altura	20 metros	18 metros
Deformação máxima	2,74	2,02
Deformação mínima	0,00	0,00

Apesar de parecer uma grande deformação nas figuras para ambos os casos, esta deformação está numa escala de 0,1, ou seja, dez vezes superior à escala real. Verifica-se de acordo com A. Ramalho et al. (2024) que o material *Tough PLA* extrudido após impressão (54,89 MPa), resiste a uma queda de 20 metros.

Tabela 3 - Resumo dos resultados obtidos

Tensões máximas em MPa				
Modelo	100 Metros	50 Metros	20 Metros	18 Metros
B	629	314	126	---
D	620	310	124	---
E	235	117	47	42,3
F	---	---	49,3	36,2

Os resultados das simulações realizadas na tabela 3 acima, verifica-se que com cada iteração as tensões máximas têm vindo a diminuir sendo os dois últimos modelos capazes de aguentar uma queda a partir de 18 metros de altura de acordo com a ficha técnica do *Tough PLA* sendo o material em filamento e ainda 20 metros de acordo com A. Ramalho et al. (2024) com material extrudido após impressão 3D.

5.3 Massa estimada da carapaça

Com os parâmetros do material inseridos no *Msc Patran* também nos foi possível estimar a massa da carapaça em cada iteração, estas estão representadas abaixo na tabela 4. O resultado para o modelo F pode ser comparado mais à frente com a massa obtida no software de preparação para impressão 3D.

Isto pode ser visto na opção “*Tools*” e depois em “*mass properties*” escolher o corpo a analisar do software *MSC Patran*.

Tabela 4- Resumo dos pesos de cada modelo simulado

Modelo	Massa em gramas
B	53,82
D	53,87
E	113,56
F	111,41

Em termos de modelos iterados e simulados conseguimos criar com a última iteração um modelo mais leve e resistente.

6.Preparação para impressão 3D

Após a terminar as simulações em *Msc Patran/Nastran* introduziu-se o modelo final (Modelo F) no slicer *Ultimaker Cura*. Exportei diretamente do *Autodesk Fusion 360* em formato .stl para o *Ultimaker Cura*, alterei algumas definições de maneira a obter um modelo o mais sólido possível.

No perfil “*Engineering*” aumentei a resolução para 0.1 mm e aumentei a espessura de parede vertical e horizontal de 1,5 para 2 mm. Adicionei também suportes em forma de árvore (“*tree*”) para impedir que o modelo começasse a deformar no centro à medida que fosse impresso pois nesta zona não tem nenhum apoio interior que permita suportar o material.

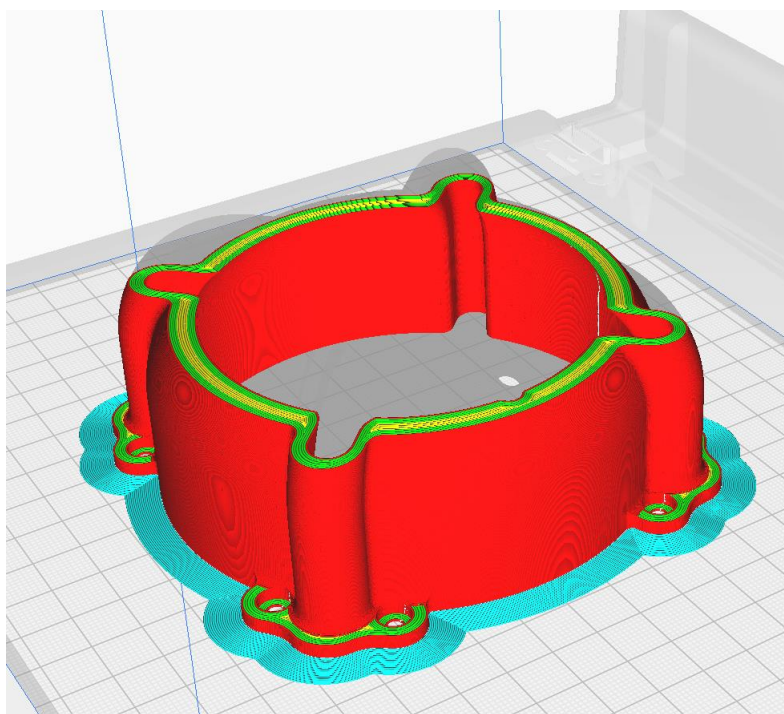


Figura 28 - Preparação da carapaça para impressão, detalhe das paredes sólidas

Foi conseguido que a carapaça desta maneira ficasse o mais sólida possível para não comprometer a sua performance em caso de queda.

Não foi alterada mais nenhuma definição em relação às pré-definições existentes, a impressão tem um tempo estimado de impressão de 24 horas e 15 minutos.

Utilizando estas definições conseguimos ver que o material estimado a ser utilizado é de 136 gramas, sem suportes o peso baixa para 112 gramas muito aproximado ao valor simulado em *MSC Patran*.

7. Conclusão

Ao realizar este projeto podemos afirmar que os objetivos foram cumpridos, criou-se uma carapaça para um drone de forma iterativa recorrendo a análise de elementos finitos, melhorando cada iteração chegando a uma versão melhorada que resiste à resistência do material extrudido para uma queda livre a partir de uma altura de vinte 20 metros.

Este projeto permitiu encadear a utilização de várias ferramentas que numa primeira fase, me permitiu desenhar uma carapaça e numa segunda fase, ao longo das várias iterações em conjunto com as simulações realizadas em Msc Patran / Nastran melhorar o design existente, tornando-o mais leve e robusto, e na última etapa permitiu-me configurar e prever como seria a impressão da carapaça tanto em termos de material utilizado e em que partes da peça bem como o tempo estimado.

Como ponto de melhoria ou continuação deste projeto seria ideal continuar a iterar o design, reduzindo ainda mais o número de arestas agudas de maneira a distribuir melhor o impacto, outro caminho que se poderia tomar ainda na parte do design seria a alteração da curvatura da carapaça para que o impacto não seja tão focado nas laterais interiores da carapaça.

Na parte da simulação seria interessante estimar o impacto noutras zonas da carapaça e utilizar as propriedades anisotrópicas do material extrudido tendo assim uma simulação mais precisa e semelhante à realidade.

8. Referências e Bibliografia

Hei, TL. & Kulshrestha, M. & Randhawa, P. (2023) *Design of a Shell to Protect Sensors and Drones*. Vol. 11 No. 3 (2024): EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems. Disponível em: <https://publications.eai.eu/index.php/sis/article/view/3976> (Acedido a 04.09.2024)

TDS PLA - Ramalho, A. (2024, 15 Janeiro). Technical data sheet – Ultimaker Tough PLA Technical data sheet [Ver anexo 1].

Awange, J. (2017). *GNSS Environmental Sensing - Revolutionizing Environmental Monitoring* (Second Edition). Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG

Fahlstrom, Paul Gerin & Gleason, Thomas James (2012, Agosto) *Introduction to UAV Systems*. Disponível em: [https://pubhtml5.com/ning/oyey/Introduction to UAV Systems Paul Gerin Fahlstr_om%2C_Thomas_James_Gleason/37](https://pubhtml5.com/ning/oyey/Introduction_to_UAV_Systems_Paul_Gerin_Fahlstr_om%2C_Thomas_James_Gleason/37) (Acedido a 02.08.2024)

Department of Defence , (2017) *Dictionary of Military and associated terms* pg. 252 Disponível em: <https://www.tradoc.army.mil/wp-content/uploads/2020/10/AD1029823-DOD-Dictionary-of-Military-and-Associated-Terms-2017.pdf> (Acedido a 18.08.2024)

Tenente-general Alfredo Cruz, (Novembro 2020) *Os UAV nas Guerras do Século XXI*, Revista Militar – Disponível em: [http://www.revistamilitar.pt/recursos/files/2020/Revista Militar Nov 2020.pdf](http://www.revistamilitar.pt/recursos/files/2020/Revista_Militar_Nov_2020.pdf) (Acedido a 25.08.2024)

ISO 1183-1:2019 (2019), *Plastics — Methods for determining the density of non-cellular plastics — Part 1: Immersion method, liquid pycnometer method and titration method* – Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/74990/4072f00efe044ab59338778ecd445e06/ISO-1183-1-2019.pdf> (Acedido a 05.07.2024)

R. L., & Wright, D. (2012). *Unmanned aircraft systems: Surveillance, ethics and privacy in civil applications*. *Computer Law & Security Review*, 28(2), 184-194. Disponível em: <https://www.dhi.ac.uk/san/waysofbeing/data/data-crone-finn-2012.pdf> (Acedido a 02.08.2024)

Modelo 3D do Drone DJI F450 Flamewheel – Disponível em: https://grabcad.com/library/dji-f450-quadcopter-drone-1/details?folder_id=1691768 (Acedido a 18.03.2024)

Modelo de inspiração da carapaça – Disponível em: <https://www.printables.com/model/373957-dji-f450-canopy-fc-protection> (Acedido a 18.03.2024)

Impact Force from Falling Object – Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/flobi.html> (Acedido a 26.04.2024)

How to Calculate Force of Impact – Disponível em: <https://sciencing.com/calculate-force-impact-7617983.html> (Acedido a 26.04.2024)

Impact forces acting on falling objects hitting the ground, cars crashing and similar cases – Disponível em: https://www.engineeringtoolbox.com/impact-force-d_1780.html (Acedido a 26.04.2024)

Autodesk Fusion | Software CAD, CAM, CAE e PCB 3D baseado na nuvem | Autodesk Disponível em: <https://www.autodesk.com/pt/products/fusion-360/overview?term=1-EAR&tab=subscription> (Acedido a 10.09.2024)

MSC Nastran | Hexagon – Disponível em: https://hexagon.com/products/product-groups/computer-aided-engineering-software/msc-nastran?utm_easyredir=www.mscsoftware.com (Acedido a 10.09.2024)

Patran | Hexagon – Disponível em: https://hexagon.com/products/patran?utm_easyredir=www.mscsoftware.com (Acedido a 10.09.2024)

9. Anexos

Anexo 1 : Ficha de Características *Tough PLA*

Technical data sheet Tough PLA

Ultimaker



ramal 25/05/2022, 09:34:37

Poisson ratio: use 0.35

Chemical composition

See Tough PLA safety data sheet, section 3

Description

Ultimaker Tough PLA is a technical PLA filament with toughness comparable to Ultimaker ABS. Ideal for reliably printing technical models at larger sizes, our Tough PLA offers the same safe and easy use as regular PLA.

Key features

With an impact strength similar and higher stiffness compared to Ultimaker ABS, Tough PLA is less brittle than regular PLA and gives a more matte surface finish quality. Heat resistance is similar to standard PLA filaments, so printed parts should not be exposed to temperatures above 60 °C.

More reliable than ABS for larger prints, with no delamination or warping. Ultimaker Tough PLA is also compatible with Ultimaker support materials (PVA and Breakaway) giving full geometric freedom when designing parts.

Applications

Functional prototyping, tooling, manufacturing aids.

Non suitable for

Food contact and in-vivo applications. Long term outdoor usage or applications where the printed part is exposed to temperatures higher than 60 °C.

Filament specifications

	<u>Value</u>	<u>Method</u>
Diameter	2.85±0.05 mm	Ultra-fast CCS-based, dual-axis diameter gauge
Max roundness deviation	0.05 mm	Ultra-fast CCS-based, dual-axis diameter gauge
Net filament weight	750 g	-
Filament length	~96 m	-

Color information

<u>Color</u>	<u>Color code</u>
Tough PLA black	RAL 9017
Tough PLA white	RAL 9003
Tough PLA green	RAL 6038 (est.)
Tough PLA red	RAL 3018

Mechanical properties*

	<u>Injection molding</u>		<u>3D printing</u>	
	<u>Typical value</u>	<u>Test method</u>	<u>Typical value</u>	<u>Test method</u>
Tensile modulus	-	-	1820 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Tensile stress at yield	-	-	37 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Tensile stress at break	-	-	37 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at yield	-	-	3.1%	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at break	-	-	3.1%	ISO 527 (50 mm/min)
Flexural strength	-	-	78 MPa	ISO 178
Flexural modulus	-	-	2490 MPa	ISO 178
Izod impact strength, notched (at 23 °C)	-	-	9 kJ/m ²	ISO 180
Charpy impact strength (at 23 °C)	-	-	-	-
Hardness	-	-	79 (shore D)	Durometer

Thermal properties

	<u>Typical value</u>	<u>Test method</u>
Melt mass-flow rate (MFR)	6-7 g/10 min	(210 °C, 2.16 kg)
Heat Deflection (HDT) at 0.455 MPa	-	-
Heat Deflection (HDT) at 1.82 MPa	-	-
Vicat softening temperature	63 °C	ISO 306
Glass transition	62 °C	DSC, 10 °C/min
Coefficient of thermal expansion	-	-
Melting temperature	151 °C	DSC, 10 °C/min
Thermal shrinkage	-	-

Other properties

	<u>Value</u>	<u>Test method</u>
Specific gravity	1.22	ISO 1183
Flame classification	-	-

*See notes

Notes

Properties reported here are average of a typical batch. The 3D printed test specimens were printed in the XY plane, using the fine quality profile in Ultimaker Cura 3.1, an Ultimaker 3, a 0.4mm AA print core, 90% infill, 0.1 mm layer height, and 205 °C nozzle temperature. The values are the average of 5 white specimens for the tensile, flexural, and impact tests. The Shore hardness D was measured in a 7-mm-thick square printed as indicated above with 100% infill. Ultimaker is constantly working on extending the TDS data.

Disclaimer

Any technical information or assistance provided herein is given and accepted at your risk, and neither Ultimaker or its affiliates make any warranty relating to it or because of it. Neither Ultimaker nor its affiliates shall be responsible for the use of this information, or of any product, method or apparatus mentioned, and you must make your own determination of its suitability and completeness for your own use, for the protection of the environment, and for the health and safety of your employees and purchasers of your products. No warranty is made of the merchantability or fitness of any product; and nothing herein waives any of Ultimaker's conditions of sale. Specifications are subject to change without notice.

Version	Version 1.001
Date	15/05/2018