



**Comparação da produção de uma ortótese através
de processos de Estereolitografia (SLA),
Processamento de Luz Digital (DLP) e *MultiJet
Printing* (MJP)**

Mestrado em Engenharia para Fabricação Digital Direta

Joana Filipa Esteves Ramalho

Leiria, setembro de 2025



Comparação da produção de uma ortótese através de processos de Estereolitografia (SLA), Processamento de Luz Digital (DLP) e *MultiJet Printing* (MJP)

Mestrado em Engenharia para Fabricação Digital Direta

Joana Filipa Esteves Ramalho

Dissertação realizada sob a orientação do Professor Doutor Joel Oliveira Correia Vasco e
coorientação do Professor Doutor Henrique de Amorim Almeida

Leiria, setembro de 2025

Originalidade e Direitos de Autor

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a/o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionada a Autora e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesma foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia para a Fabricação Digital Direta, no ano letivo 2024/2025 da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha mãe, Teresa Esteves, pelo amor incondicional, pela força e pelo exemplo de perseverança que sempre me transmitiu. A quem nunca duvidou que este trabalho seria terminado e acreditou em mim todos os dias. Sem este apoio, dedicação e incentivo, não teria sido possível.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, expressar a minha sincera gratidão ao meu orientador Professor Joel Vasco e coorientador Professor Henrique Almeida, pelo acompanhamento, disponibilidade e orientação ao longo do desenvolvimento desta tese.

Ao Instituto Politécnico de Leiria, em particular, à Escola Superior de Tecnologia e Gestão pelo conhecimento transmitido e pelas condições proporcionadas para realizar este projeto.

Agradeço também à X3D Engineering e aos meus colegas, pela disponibilização dos recursos necessários e pelas condições que tornaram possível a realização deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos, pela motivação, paciência, compreensão e ajuda prestada sempre que necessário.

Um agradecimento à minha família, em especial à minha mãe, à minha irmã, ao meu pai e ao meu namorado, aquele que é o meu pilar, pelo apoio incondicional, prestação de ajuda em todas as formas possíveis, pela paciência e incentivo contínuo em todas as etapas deste mestrado e em todas as etapas da minha vida e objetivos pessoais.

Esta página foi deixada intencionalmente em branco

Resumo

O fabrico aditivo, atualmente, encontra-se bastante presente na área médica, utilizado para produzir dispositivos médicos como implantes, próteses e ortóteses. No âmbito das ortóteses, a produção personalizada é promissora pois poderá melhorar a qualidade de vida das pessoas e reduzir desconforto, para além de que as tecnologias de impressão 3D a baixo custo permitem melhorar a estética e a forma de utilização. Estas tecnologias são utilizadas na fase do processo de criação das ortóteses. Numa primeira fase é utilizada o processo de engenharia inversa de forma a digitalizar o segmento corporal, o antebraço e utilizam-se *softwares* de modelação 3D para processar a superfície. Por fim, o modelo é impresso através das tecnologias pretendidas.

Este trabalho baseia-se na comparação de três tecnologias de impressão para o fabrico de uma ortótese de pulso, Estereolitografia, Processamento de Luz Digital e *Multijet Printing*. Para tal, foi desenvolvido um modelo 3D de referência e selecionados diferentes materiais de impressão, avaliados quanto a parâmetros técnicos e práticos como custos de produção, propriedades mecânicas, disponibilidade e adequação a aplicações médicas.

Os resultados obtidos pela ferramenta multicritério AHP mostram que a tecnologia vencedora é o DLP, por apresentar melhor equilíbrio entre qualidade de impressão e desempenho mecânico. O PRO-BLK 10 destacou-se no cenário sem necessidade de biocompatibilidade, o Rigid White adequou-se no cenário com biocompatibilidade, garantindo segurança clínica. Por simulações estruturais no *SolidWorks Simulation*, a espessura de 3.25mm revelou-se mais eficiente para a produção da ortótese.

Palavras-chave: Ortótese; Custmização; Estereolitografia; Processamento de Luz Digital, MultiJet Printing.

Esta página foi deixada intencionalmente em branco

Abstract

Additive manufacturing is currently widely present in the medical field, being used to produce medical devices such as implants, prostheses, and orthoses. In the context of orthoses, personalized production is promising, as it may improve people's quality of life and reduce discomfort. Additionally, low-cost 3D printing technologies make it possible to enhance aesthetics and usability. These technologies are used during the orthosis design process. First, reverse engineering is applied to digitize the body segment—in this case, the forearm—and 3D modeling software is used to process the surface. Finally, the model is printed using the selected technologies.

This work is based on the comparison of three printing technologies for the manufacture of a wrist orthosis: Stereolithography, Digital Light Processing, and MultiJet Printing. For this purpose, a reference 3D model was developed and different printing materials were selected and evaluated according to technical and practical parameters such as production costs, mechanical properties, availability, and suitability for medical applications.

The results obtained with the AHP multi-criteria method show that the winning technology is DLP, as it presents the best balance between printing quality and mechanical performance. PRO-BLK 10 stood out in the scenario without biocompatibility requirements, while Rigid White proved suitable in the biocompatible scenario, ensuring clinical safety. According to structural simulations performed in SolidWorks Simulation, the 3.25 mm thickness was shown to be the most efficient for manufacturing the orthosis

Keywords: Orthosis; Customization; Stereolithography; Digital Light Processing; MultiJet Printing.

Índice

| | |
|--|-------------|
| Originalidade e Direitos de Autor | iii |
| Dedicatória | iv |
| Agradecimentos | v |
| Resumo | vii |
| Abstract | ix |
| Lista de Figuras | xiii |
| Lista de tabelas | xv |
| Lista de siglas e acrónimos | xvi |
| 1. Introdução | 1 |
| 2. Estado da Arte | 3 |
| 2.1. Ortótese | 3 |
| 2.2. Tecnologias de Fabrico Aditivo | 4 |
| 2.2.1. Preparação de trabalho..... | 5 |
| 2.3. Processo de Fotopolimerização em câmara (VPP) | 7 |
| 2.3.1. Estereolitografia (SLA) | 8 |
| 2.3.2. Processamento de Luz Digital (DLP)..... | 11 |
| 2.3.3. Fluxo de trabalho de processos de fotopolimerização em câmara | 13 |
| 2.3.4. Pós-processamento de processos de fotopolimerização em câmara..... | 14 |
| 2.4. Processos de Material Jetting (MJT) | 16 |
| 2.4.1. MultiJet Printing..... | 16 |
| 2.4.2. Fluxo de trabalho do processo de <i>MultiJet Printing</i> | 19 |
| 2.4.3. Pós-processamento do processo de <i>MultiJet Printing</i> | 19 |
| 2.5. Materiais fotossensíveis | 20 |
| 2.6. Distinção de tecnologias, análise comparativa | 22 |
| 3. Materiais e métodos | 25 |
| 3.1. Processo de customização de ortóteses | 25 |
| 3.1.1. Aquisição de informação e preparação de modelos 3D | 25 |
| 3.1.2. Impressão de protótipos 3D | 29 |
| 3.2. Seleção de materiais e equipamentos para impressão de protótipos | 30 |
| 3.2.1. Seleção de equipamentos de impressão | 30 |
| 3.2.2. Seleção de materiais de impressão | 31 |
| 4. Procedimento experimental | 35 |
| 4.1. Posicionamento do modelo na plataforma de impressão | 36 |
| 4.2. Simulações de impressão | 38 |
| 4.3. Tabela AHP – hierarquização de critérios | 43 |
| 4.4. Simulação numérica | 45 |

| | |
|---|-----------|
| 5. Análise e Discussão de resultados | 49 |
| 6. Conclusões..... | 57 |
| 6.1. Trabalhos futuros..... | 58 |
| Referências Bibliográficas | 59 |
| Anexos | 63 |
| Apêndices | 82 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 Ortótese para imobilizar os segmentos lesionados [3] | 4 |
| Figura 2 - Fluxo de trabalho do processo de impressão [10]..... | 6 |
| Figura 3 - Fotopolimerização em câmara: (a) <i>bottom-up</i> ; (b) <i>top-down</i> [15]..... | 8 |
| Figura 4 - Representação esquemática do processo de Estereolitografia (SLA) [16]..... | 10 |
| Figura 5 - Impressoras de produção em SLA [10] | 10 |
| Figura 6 - Representação esquemática do Processamento de Luz Digital (DLP) [22]..... | 12 |
| Figura 7 - Impressoras de produção em DLP [24] | 13 |
| Figura 8 - Representação esquemática do processo de MultiJet Printing (MJP) [32] | 17 |
| Figura 9 - Representação esquemática do processo de multi-material de MultiJet Printing (MJP) | 18 |
| Figura 10 - Impressoras de produção em DLP [33]..... | 18 |
| Figura 11 - Comparação do acabamento das camadas devido à diferença entre fontes de luz. A) SLA. B) DLP [6] | 23 |
| Figura 12 - Digitalização do antebraço..... | 25 |
| Figura 13 - Remoção de triângulos da superfície | 26 |
| Figura 14 - Preenchimento de furos | 26 |
| Figura 15 - Suavização da área..... | 26 |
| Figura 16 - Superfície do cotovelo fechada..... | 27 |
| Figura 17 - Superfície da mãe fechada | 27 |
| Figura 18 - Modelo de superfícies | 27 |
| Figura 19 - Encaixes idealizados para a ortótese..... | 28 |
| Figura 20 - <i>Design</i> de losangos utilizado na modelação da ortótese | 28 |
| Figura 21 - Dimensões finais da ortótese | 29 |
| Figura 22 - Fluxograma de produção com e sem requisito de biocompatibilidade | 29 |
| Figura 23 - Impossibilidade de encaixe da ortótese da impressora <i>Figure 4 Standalone</i> | 30 |
| Figura 24 - Possíveis filtros pelo <i>Material Finder</i> da <i>3D Systems</i> [39]..... | 32 |
| Figura 25 – Fluxo de trabalho preconizado para a prototipagem da ortótese | 34 |
| Figura 26 - possíveis orientações na plataforma de impressão..... | 36 |
| Figura 27 - Orientação da ortótese nas plataformas de impressão nas impressoras de SLA | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 28 - Orientação possível de uma parte da ortótese na plataforma da impressora de DLP – <i>Figure 4 Modular</i> | 37 |
| Figura 29 - Possíveis orientações do modelo da ortótese na plataforma da impressora de MJP | 37 |
| Figura 30 - Zona de aplicação das forças 20, 50, 100N | 46 |
| Figura 31 - Representação do diagrama de cores e valores respectivos obtidos conforme aplicação de cargas | 46 |

Lista de tabelas

| | | |
|-----------|---|----|
| Tabela 1 | Categorias de FA e tipos de materiais processáveis | 5 |
| Tabela 2 | - Características das impressoras de SLA [19] | 11 |
| Tabela 3 | - Propriedades das impressoras de processamento de DLP [24]..... | 13 |
| Tabela 4 | - Propriedades das impressoras de processamento de DLP [33]..... | 19 |
| Tabela 5 | - Consumíveis de SLA, DLP e MJP por tipo de material | 22 |
| Tabela 6 | - Principais diferenças técnicas das tecnologias de impressão a estudar | 23 |
| Tabela 7 | - Impressoras selecionadas para cada tecnologia para o estudo de impressão | 31 |
| Tabela 8 | - Materiais selecionados e características comuns para cada tecnologia para o estudo de impressão | 33 |
| Tabela 9 | - Simulação de impressão e custos associados na impressora de SLA - <i>ProJet 6000HD</i> | 39 |
| Tabela 10 | - Simulação de impressão e custos associados na impressora de DLP - <i>Figure 4 Modular</i> | 41 |
| Tabela 11 | - Simulação de impressão e custos associados na impressora de MJP - <i>ProJet 2500 Plus</i> | 42 |
| Tabela 12 | - Processo de hierarquização de critérios AHP para modelo 3D de contacto direto | 44 |
| Tabela 13 | - Processo de hierarquização de critérios AHP para modelo 3D de contacto indireto | 44 |
| Tabela 14 | - Aptidão dos materiais face aos critérios definidos para o modelo 3D de contacto direto | 50 |
| Tabela 15 | - Aptidão dos materiais face aos critérios definidos para o modelo 3D de contacto indireto | 51 |
| Tabela 16 | - Dados retirados das simulações de aplicação de cargas nas várias espessuras definidas | 54 |
| Tabela 17 | - Impacto da alteração da espessura na simulação de prototipagem da ortótese..... | 56 |

Lista de siglas e acrónimos

3D – Tridimensional

ABS - *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)

AHP - *Analytic Hierarchy Process* (Processo Analítico Hierárquico)

ASTM - *American Standards for Testing Materials* (Sociedade Americana de Testes e Materiais)

CAD - *Computer Aided Design* (Desenho Assistido por Computador)

DLP - *Digital light processing* (Processamento de Luz Digital)

DMD - *Digital Micromirror Device* (Dispositivo de Microespelho Digital)

FA – Fabrico Aditivo

FDD – Fabricação Digital Direta

FEP - *Fluorinated Ethylene Propylene* (Etileno Propileno Fluorado)

FDM – *Fused Deposition Modeling* (Modelação por Deposição Fundida)

ISO – *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização)

LED - *Light Emitting Diode* (Díodo Emissor de Luz)

MJP - *MultiJet Printing* (Impressão por Múltiplos Jatos)

MJT - *Material Jetting* (Impressão de Material)

PC - *Polycarbonate* (Policarbonato)

PP - *Polypropylene* (Polipropileno)

SLA – *Stereolithography Apparatus* (Estereolitografia)

STL – *Standard Triangle Language* (Linguagem Padrão de Triângulos)

UV - Ultravioleta

VOC - *Volatile organic compounds* (Compostos Orgânicos Voláteis)

VPP - *Vat Photopolymerization* (Fotopolimerização em câmara)

1. Introdução

A Fabricação Digital Direta (FDD) abrange várias tecnologias de impressão tridimensional (3D) que permitem a produção de protótipos e/ou produtos finais através de um ficheiro digital desenvolvido por Desenho Assistido por Computador (CAD - *Computer Aided Design*), por via de vários processos de Fabrico Aditivo (FA). Este método de fabrico baseia-se no método de adição de material, isto é, construindo um modelo pela sobreposição de camadas, existindo várias formas ou tecnologias para o realizar, ao contrário do método tradicional de fabrico subtrativo onde há a remoção de material até se obter a forma pretendida.

Na área da saúde, o fabrico aditivo é cada vez mais utilizado para produzir dispositivos médicos personalizados como próteses e ortóteses, que permitem movimentos mais complexos e um retorno à vida normal de forma confortável, para além de que uma aquisição anatómica precisa permite evitar pontos de pressão e outros motivos de desconforto e dor.

Assim, com este trabalho, pretende-se comparar a produção de uma ortótese através de três tecnologias de fabrico aditivo, mais propriamente a Estereolitografia (SLA - *Stereolithography*), Processamento de Luz Digital (DLP - *Digital light processing*) e Impressão por Múltiplos Jatos (MJP - *MultiJet Printing*). Para isso serão utilizados equipamentos e *softwares* da marca *3D Systems* disponibilizados pela empresa X3D Engineering e a informação analisada contempla literatura e informação contida nas brochuras dos fornecedores. Estes recursos serão usados para proceder à análise de materiais disponíveis quanto às suas propriedades mecânicas e químicas, realização de simulação de impressão, simulação numérica em *Solidworks simulation*, orçamentação e impressão dos modelos 3D.

As próteses e ortóteses são produtos que estão em contacto regular com a pele, pelo que devem ser biocompatíveis para que não haja o risco de algum tipo de reação alérgica. Devem também ser rígidos, para que o segmento corporal que se encontra imobilizado, assim se mantenha, para recuperar na totalidade, sendo que deve igualmente ser minimamente maleável para a colocação no mesmo. Também é necessário ter em conta que o planeamento e desenvolvimento inadequado da ortótese pode resultar em consequências graves para a saúde do paciente e para o próprio profissional.

Após a introdução, o segundo capítulo apresenta o estado da arte, onde são abordados os conceitos fundamentais relacionados com as ortóteses e respetivos problemas médicos, bem como as diferentes tecnologias de fabrico aditivo, em particular os processos de fotopolimerização em câmara, que incluem a Estereolitografia e o Processamento de Luz Digital, e ainda os processos de *Material Jetting*, e materiais fotossensíveis.

O terceiro capítulo descreve os materiais e métodos utilizados, nomeadamente o processo de customização da ortótese, a aquisição de modelos tridimensionais, a seleção de equipamentos e materiais de impressão e a preparação necessária para o fabrico.

O quarto capítulo corresponde ao procedimento experimental, detalhando o posicionamento do modelo, as simulações de impressão, a aplicação do método AHP para hierarquização de critérios e a simulação numérica.

No quinto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos, comparando as tecnologias em estudo quanto a custos, propriedades mecânicas e adequação dos materiais às exigências médicas.

Por fim, o sexto capítulo reúne as conclusões principais, salientando as contribuições do trabalho e apontando possíveis linhas de investigação futura.

2. Estado da Arte

No âmbito da revisão da literatura pretende-se fazer um enquadramento geral das noções fundamentais com conceitos importantes para a compreensão dos objetivos deste trabalho descritos no documento.

2.1. Ortótese

Uma ortótese pode ser definida como um dispositivo que permite suportar e modificar características estruturais e funcionais do sistema neuromuscular e esquelético. Esta apresenta funcionalidades como auxiliar o movimento em geral, corrigir o alinhamento de um segmento corporal, proteger de estímulos externos, restaurar a mobilidade e ainda aliviar e distribuir forças [1].

As ortóteses podem ser de três tipos sendo estes os colocados na coluna espinal, no membro superior e no membro inferior. No que diz respeito à coluna espinal, esta pode ser colocada para limitar o movimento, corrigir deformidades e melhorar o segmento espinal (ortótese ortopédica), suportar condições estáveis da coluna (ortótese cervical) e ainda ser utilizada em fraturas que se apresentem instáveis (ortótese cervical torácica). Em relação aos membros superiores, as ortóteses podem ser utilizadas no braço e no pulso/mão de modo a fornecer imobilização e libertação na paralisia da mão (Figura 1). Por fim, para os membros inferiores, as ortóteses estão presentes no fortalecimento do joelho, na articulação tornozelo-pé, no pé (alívio de áreas de pressão no pé e para complicações como má circulação, calos e neuropatia), e por fim nas ancas, para evitar movimentos de flexão, adução e rotação interna do quadril.

Para o membro superior, as ortóteses podem ainda ser classificadas tendo em conta o seu tipo de movimento: ortótese estática que não permite movimentação e fornece suporte, estabilidade e imobilidade, e a ortótese dinâmica que permite movimento e auxilia no alinhamento e cicatrização de feridas [2]



Figura 1 Ortótese para imobilizar os segmentos lesionados [3]

Este tipo de produtos médicos são colocados nos vários segmentos corporais do paciente que afetam a condição e o funcionamento do sistema musculoesquelético, não substitui a falta de um membro corporal, mas possibilitam a compensação de uma função perdida [4].

2.2. Tecnologias de Fabrico Aditivo

O Fabrico Aditivo (FA), surgiu nos anos 80, como uma tecnologia de produção, a partir de modelos CAD 3D, camada por camada, num processo onde não existe restrições geométricas em comparação com os processos de fabricação convencionais [5]. A tecnologia tem como objetivo produzir protótipos rápidos e funcionais através de vários materiais que podem promover a eliminação de erros de projeto e encurtar o prazo de entrega dos mesmos [6]. O FA constitui um conjunto de tecnologias que permitem obter componentes físicos a partir de modelos CAD ou pela conversão de dados digitais provenientes de *scanners* 3D. Ao contrário dos processos de fabrico subtrativo que removem material até obter a forma pretendida, o princípio de fabricação aditiva baseia-se no método de adição, ou seja, sobrepondo camadas de material umas sobre outras, existindo diversas tecnologias e materiais para o fazer. Ao comparar com o fabrico convencional, o fabrico aditivo apresenta um potencial muito maior de customização e geometrias complexas num espaço de tempo reduzido, sendo parte do desenvolvimento da Indústria 4.0 [7] [8].

Segundo a norma ISO/ASTM 52900:2021, os processos de fabrico aditivo podem ser distinguidos em 7 categorias sendo elas a fotopolimerização em câmara por processos de SLA e DLP (com o uso de resinas fotossensíveis com ou sem nanocargas metálicas ou cerâmicas); impressão de material por processos de *PolyJet*[®] (com o uso de materiais termoplásticos, ceras, fotopolímeros, materiais óticos e eletrónicos); impressão de aglomerante por BPM (com materiais poliméricos, metais e pós cerâmicos); extrusão de

material por FDM (com materiais poliméricos e compósitos); fusão de camada de pó por SLS, SLM e EBM com materiais poliméricos, metais e pós cerâmicos); laminação em folhas por LPM (com materiais em papel, metal e polímeros); e Deposição Direcionada de Energia (com materiais metálicos em pós ou em filamentos) [9]. Cada categoria apresenta várias opções de tecnologias e diferentes matérias. Cada categoria apresenta características diferentes e cada uma com os seus materiais específicos, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 Categorias de FA e tipos de materiais processáveis

| Categorias de FA conforme a ISO/ASTM 52900:2021 | Tipos de material e formas comerciais |
|---|--|
| <i>Vat Photopolymerization</i> | Resinas fotossensíveis |
| <i>Material Jetting</i> | |
| <i>Binder Jetting</i> | Pós poliméricos, cerâmicos e metálicos |
| <i>Material Extrusion</i> | Filamentos <i>Polymer-semelhante</i> , <i>pellets</i> , filamentos compósitos, pasta cerâmica e pastas cementícias |
| <i>Powder Bed Fusion</i> | Pós poliméricos e metálicos |
| <i>Sheet Lamination</i> | Papel e Lâminas de Compósito |
| <i>Directed Energy Deposition</i> | Pós metálicos |
| | Fio metálico |

Neste trabalho, serão especificamente estudados os processos FA da categoria Fotopolimerização em câmara (VPP - *Vat Photopolymerization*): o Processamento de Luz Digital (DLP) e a Esterolitografia (SLA); e da categoria de Impressão de Material (MJT - *Material Jetting*) (MJT): a Impressão *MultiJet Printing* (MJP). Estes processos apresentam características importantes para a produção de ortóteses como o acabamento superficial e a utilização de materiais (resinas) biocompatíveis, aptos para a aplicação em estudo.

2.2.1. Preparação de trabalho

Cada um dos métodos de impressão 3D requer uma preparação de instruções que são essenciais para o processo, que variam de acordo com a tecnologia de impressão, modelo de impressora e material a utilizar.

O processo de impressão tem sempre início no *software* de fatiamento (*slicer*), que torna possível a programação da forma de impressão da peça desejada. Neste caso, trata-se de um desenvolvimento fechado, o que significa que as peças a imprimir nas impressoras que serão discutidas neste documento, só podem ser feitas no *software* da *3D Systems*, o *3D Sprint*. Para além disso, no *software* podem ser parametrizadas as questões de tolerâncias das peças, com a ajuda de testes de calibrações.

Os mecanismos de fabricação pelas tecnologias de fotopolimerização em câmara podem ser divididos em várias etapas (Figura 2).



Figura 2 - Fluxo de trabalho do processo de impressão [10]

A primeira etapa abrange o tratamento do ficheiro CAD que foi construído através da modelação de uma peça ou pela digitalização de um modelo físico já existente. Este ficheiro é importado para um *software* associado à impressora em que se vai realizar o trabalho, onde pode ser reparada a geometria ou erro de malha, onde é definido o detalhe/resolução da peça a imprimir, orientada sob a plataforma de impressão e colocados os suportes de forma estratégica. Em muitas das tecnologias de impressão, as peças são colocadas nas plataformas, orientadas corretamente nos eixos, com ou sem inclinações, para que possa ser minimizado o custo da impressão [11].

É preciso notar que ao diminuir os valores de altura de camada, resultam em aumentar a resolução da impressão bem como o tempo de impressão [8]

Os ficheiros que são importados entre *softwares* são em formato de Linguagem Padrão de Triângulos (.STL – “*Standard Triangle Language*”), um arquivo criado sobre forma de triângulos que repetidos, aproximados e acoplados originam um sólido. A quantidade de triângulos presentes no arquivo .STL criado, vão determinar a resolução do ficheiro. Isto é, quanto mais triângulos mais pequenos constituírem o ficheiro, mais resolução ele vai ter, pois a peça originada não irá ser tão facetada quando comparada com uma peça com menos triângulos de maiores dimensões, o que resultará em maior detalhe, logo um ficheiro mais difícil de manipular [12]

Os maiores defeitos de um modelo 3D podem ser justificados por triângulos sobrepostos ou por buracos na malha, ao serem criados, melhorados ou exportados de um programa e por isso devem se corrigidos no programa onde foram criados.

2.3. Processo de Fotopolimerização em câmara (VPP)

Os processos de fotopolimerização constituem uma das técnicas de fabrico aditivo na qual são utilizadas resinas fotopolimerizáveis (fotopolímeros) que são armazenadas em câmara e expostas à radiação Ultravioleta (UV - *Ultravioleta*) ou luz visível de forma controlada para obter camadas de material polimerizado, que constitui o modelo final [13]. Neste processo, mediante uma luz de polimerização, os materiais fotossensíveis são irradiados, passando da fase líquida para a fase sólida através do processo de reticulação ou cura do material, proporcionando estabilidade ao modelo. No processo de cura, os foto-iniciadores libertam substâncias catalisadoras para criar cadeias entre monómeros e oligómeros, sendo que ainda um agente que bloqueia a radiação excessiva da resina. Este processo é irreversível sendo que não é possível voltar a colocar o material no estado líquido [6].

Segundo a norma harmonizada pela Organização Internacional de Normalização (ISO - *International Organization for Standardization*) / Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM - *American Standards for Testing Materials*) 52900:2021, os processos de fotopolimerização em câmara incluem o SLA, DLP e a Produção Contínua de Interface Líquida (CLIP/DLS) [14].

Em ambas as tecnologias a apresentar nos subcapítulos seguintes, existem dois tipos de construção de modelo que podem mudar entre fabricantes. Nas abordagens *top-down* e *bottom-up*, a principal diferença é a posição da fonte de luz UV em relação à cuba de resina, que pode ser colocada por baixo da cuba (que tem de ter uma película transparente que permita a passagem de luz) ou colocada em cima [15]. Entre ambas as tecnologias, no que concerne à fonte de luz UV, o SLA utiliza uma fonte de laser e o DLP um projetor de luz digital.

- Na abordagem *bottom-up* (de baixo para cima), a plataforma de impressão que se encontra em cima, penetra na cuba com resina até uma distância da película de impressão igual à espessura da camada definida. É então projetada a imagem sobre essa camada de resina líquida, que com a luz UV que se encontra em baixo, solidifica e forma a camada como representado na Figura 3. Depois, a plataforma com a camada acabada de construir sobe (é descolada da película transparente por onde passou a luz UV) para que seja possível preencher esse espaço com uma nova camada de resina líquida que será novamente solidificada aquando da nova descida da

plataforma (Figura 3a). Neste mecanismo é necessário menos quantidade de resina [16].

- Na abordagem *top-down* (de cima para baixo) a resina líquida encontra-se livre por cima da plataforma de impressão. A plataforma submerge no líquido, deixando resina suficiente acima, (consoante a espessura de camada definida) que será solidificada por exposição à luz UV que se encontra por cima. Depois de formada a camada, a plataforma volta a descer para permitir o preenchimento de uma nova camada de resina líquida por cima da já solidificada para que o processo se repita como sugere a imagem da Figura 3b.

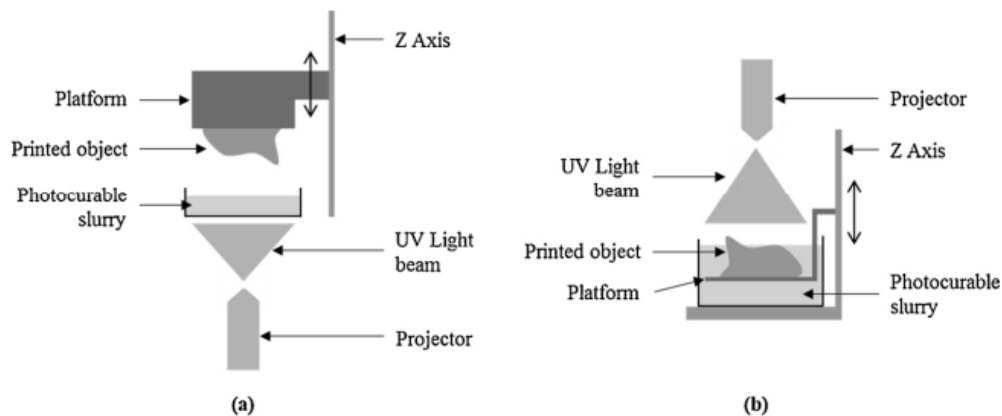


Figura 3 - Fotopolimerização em câmara: (a) *bottom-up*; (b) *top-down* [15]

Em ambas as abordagens de construção, o processo vai-se repetindo até a peça estar completamente construída.

Deve ter-se em atenção que estes processos podem influenciar a qualidade da impressão. Por exemplo, o movimento de descolagem da plataforma pode danificar a camada construída, o contacto da peça com a luz durante a sua construção, ou até mesmo a forma como a resina é redistribuída durante o movimento da plataforma [15].

2.3.1. Estereolitografia (SLA)

A estereolitografia (SLA), tal como já foi referido, pertence à categoria VPP. Este processo de impressão com resina mais conhecido e comercializado apareceu pela primeira vez em 1981 com a invenção do japonês Hideo Kodama que realizou o primeiro contacto com a cura de polímeros fotossensíveis através da luz UV [17]. O termo “estereolitografia” foi

patenteado pelo americano Chuck Hull que fundou em 1984 a empresa *3D Systems* (EUA) para comercializar a solução [14].

Esta tecnologia tornou-se muito popular pela produção de protótipos de alta precisão, com peças isotrópicas e estanques, sendo versátil e indicada para uma vasta área de aplicações. Para além disto, as peças de SLA são conhecidas por possuírem os detalhes mais nítidos e acabamentos superficiais mais suaves quando comparada com as restantes tecnologias, para além de possibilitar criá-los de forma repetida e continuamente precisa, sendo por isso a melhor tecnologia no que toca a custo-benefício [18]

Esta forma de impressão 3D, baseia-se no varrimento no plano XY de um laser UV para polimerizar seletivamente (curar) com precisão as secções transversais de fotopolímeros, transformando as resinas líquidas fotossensíveis (reativas à luz UV) em objetos sólidos, camada a camada [6]

2.3.1.1. Funcionamento da tecnologia SLA

A tecnologia de SLA utiliza um projetor a laser, que é focado em vários pontos de uma camada de resina líquida, que a vai solidificando de acordo com o movimento do mesmo para formar um objeto 3D. O laser direciona a luz para dois espelhos galvanómetros que se vão movendo nos eixos de X e Y e vão direcionando a luz para as coordenadas corretas para curar a resina fotopolimerizável. A resolução com que o objeto é impresso depende do diâmetro do feixe laser do equipamento selecionado [14].

No geral, as impressoras de SLA são compostas por 5 elementos principais, a plataforma de impressão, a fonte de energia, a cuba ou taque de resina, um misturador e um controlador que contem o projeto a desenvolver (Figura 4). A fonte contém uma lente que liga, desliga e foca o laser sobre a superfície de resina e os espelhos para a projeção do feixe. Como entendido anteriormente, a cuba contém a resina em estado líquido que como pode ser mais viscosa (dependendo do material a imprimir) conta com o apoio de um misturador (ou nivelador) para distribuir uniformemente a resina. A plataforma de impressão é o que vai suportar a peça 3D impressa, que se movimenta verticalmente durante o processo de formação das camadas. Por último, este sistema de controlo, controla o ambiente (temperatura de operação e da cuba) e a sequência de operações da impressora, tal como a velocidade de scannamento ou a profundidade focal do feixe que determina a qualidade de impressão [16].

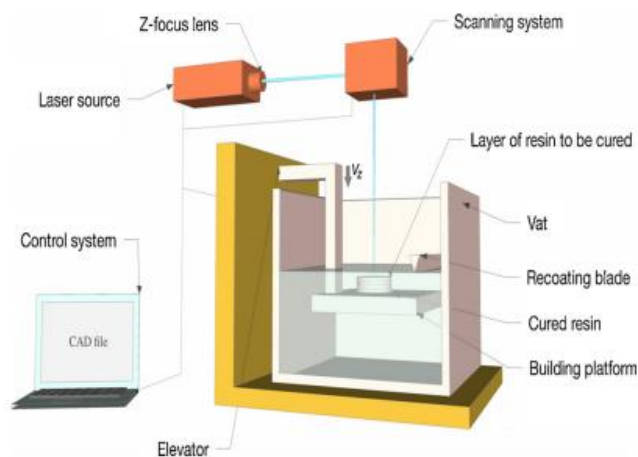


Figura 4 - Representação esquemática do processo de Estereolitografia (SLA) [16]

2.3.1.2. Equipamentos disponíveis para SLA

A *3D Systems* nas últimas 3 décadas lançou 21 versões de impressoras SLA, o que possibilitou a melhoria da qualidade de impressão sem colocar em causa a velocidade da mesma, como os principais modelos atuais mostrados na Figura 5, a *SLA 750* para soluções em escala industrial, *SLA ProX 950* para peças de grandes dimensões, *ProJet 6000 HD* para impressões mais pequenas com grande qualidade e *ProJet 7000 HD*. A *3D Systems* é a única empresa que oferece soluções com *hardware*, *software* e materiais integrados, ajustados para atingir ótima qualidade de peças SLA, com precisão e repetibilidade. As impressoras funcionam com uma ampla gama de materiais e estão disponíveis com capacidades e tamanhos diferentes como verificado na Figura 5 e Tabela 2, ótimas para qualquer tamanho de peça para prototipagem, produção de produtos finais e outro tipo de ferramentas e acessórios, por não alterarem.



Figura 5 - Impressoras de produção em SLA [10]

Na Tabela 2 são apresentadas as principais diferenças das impressoras mencionadas.

Tabela 2 - Características das impressoras de SLA [19]

| Características | SLA 750 | ProX 950 | ProJet 6000 HD | ProJet 7000 HD |
|--|--|--|--|--|
| Volume máximo de construção | 750 x 750 x 550 mm | 1500 x 750 x 550 mm | 250 x 250 x 250 mm | 380 x 380 x 250 mm |
| Tamanho máximo da peça curta | 750 x 750 x 50 mm | N/A | 250 x 250 x 50 mm | 380 x 380 x 50 mm |
| Precisão | >34 mm $\pm 0.15\%$ do tamanho da característica | 1920 x 1080 pixel 0.025-0.05 mm per 25.4 mm | | |
| Recurso fino / digitalização de superfície externa | 125 μm | | Até 75 μm | |
| Recurso maior / digitalização | 1000 μm | 750 μm | | |
| Condições de temperatura operacional | 18-28 °C (64-82 °F) | 20-26 °C (68-79 °F) | 18-28 °C (64-82 °F) | |
| Especificações elétricas | 200-240 VAC, 1-Ph, 50/60Hz, 24A | 200-240 VAC 50/60 Hz, single-phase, 50 amps | 100-240 VAC, 50/60 Hz, single-phase, 750 W | 100-240 VAC, 50/60 Hz, single-phase, 750 W |

As impressoras de SLA conseguem imprimir peças pequenas e detalhadas ao nível dos milímetros e também peças até 1,5m de comprimento, com a mesma precisão e resolução sem que empenem nem encolham. [10].

2.3.2. Processamento de Luz Digital (DLP)

O processamento de luz digital foi desenvolvido na época de 80, com base na tecnologia de projeção de imagem, sendo que hoje em dia é bastante utilizada em várias indústrias, entre elas, a médica [20]. Este método de impressão consegue curar seletivamente resinas fotossensíveis líquidas, camada a camada até ser criado um modelo final em 3D.

A principal vantagem do processo de DLP é a alta precisão que este oferece, contudo apresenta limitações no que toca a dimensões, não se podendo imprimir modelos muito grandes, sendo muito usada para impressão de modelos perdidos para joelheria ou componentes de odontologia. Para além disto, esta solução de impressão apresenta valores de aquisição um pouco elevados.

2.3.2.1. Funcionamento da tecnologia DLP

A tecnologia de DLP começou a ser idealizada em 1987 pela marca *Texas Instruments* ao desenvolver os projetores que constituem a impressora. O processo de DLP baseia-se numa tecnologia ótica de processamento de fontes de luz em materiais fotossensíveis. No que toca à construção do modelo, a luz é processada por uma máscara dinâmica ou por um Dispositivo

de Microespelho Digital (DMD - *Digital Micromirror Device*), onde os espelhos se movem a fim de controlar e direcionar a luz que é projetada na resina fotossensível através de uma película transparente de Etileno Propileno Fluorado (FEP - *Fluorinated Ethylene Propylene*), como representado na Figura 6 [20], [21]. Cada um desses espelhos gira independentemente e representa um pixel de um padrão de imagem binário do modelo na resina líquida, que oferece informação específica para a construção de cada camada individualmente que depois solidifica. A resolução da impressora nos eixos X e Y, por norma corresponde ao número e tamanho destes microespelhos, da ótica e do projetor [8].

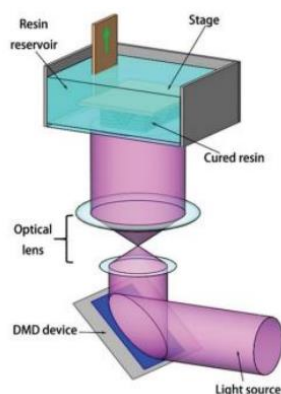


Figura 6 - Representação esquemática do Processamento de Luz Digital (DLP) [22]

No entanto, tratando-se de um redirecionamento da luz pelos espelhos, a luz emitida pelo projetor que é mais pequeno, expande-se para revestir uma maior área, o que pode traduzir-se numa maior notoriedade de pixéis em peças maiores, causando uma diminuição na resolução. Ou seja, como o número de pixéis vai ser sempre o mesmo, as peças mais pequenas e finas poderão ter mais precisão do que as peças maiores [23]

2.3.2.2. Equipamentos disponíveis para DLP

A *3D Systems* é uma das marcas que patenteia a tecnologia de DLP, com impressoras fechadas, apenas possibilitando o uso de materiais fornecidos pela mesma, tal como na tecnologia anterior. Através da *3D Systems* tem-se acesso a quatro modelos de impressoras de DLP “*Figure 4*”, mostrados através da Figura 7, para soluções de fabrico de forma económica, consoante os requisitos necessários. As duas principais impressoras para produção através do DLP são a *Figure 4® Standalone* para impressões de prototipagem rápida com um volume de impressão pequeno e a *Figure 4® Modular*, uma impressora semiautomatizada que permite impressões maiores de acordo com as necessidades de

prototipagem e tamanho de produção. Estas impressoras apresentam a mesma resolução, o mesmo *pixel pitch*, e o mesmo comprimento de onda como é possível verificar na Tabela 3. Para além destas, apresentam-se mais dois modelos, a *Figure 4 Jewelry*, destinada a usar materiais que posteriormente serão fundidos para produção de joias e a *Figure 4 Production*, uma solução de fabrico digital 3D personalizada e integrada, que possui um fluxo de trabalho compatível com o *software* [24].



Figura 7 - Impressoras de produção em DLP [24]

Tabela 3 - Propriedades das impressoras de processamento de DLP [24]

| Propriedades | Figure 4® Standalone | Figure 4® Modular | Figure 4® Production | Figure 4® Jewelry |
|---|--|--|--|--|
| Volume de impressão | 124.8 x 70.2 x 196 mm | 124.8 x 70.2 x 346 mm | 124.8 x 70.2 x 346 mm | 124.8 x 70.2 x 196 mm |
| Espessura de camada mínima | - | 0.01 mm | | |
| Resolução | 1920 x 1080 pixel | | | |
| Pixel Pitch | 65 µm (390.8 effective PPI) | | | |
| Comprimento de onda | 405 nm | | | |
| Condições ambiente operacional - Temperatura - Humidade | 18-28 °C (64-82 °F) 20-80% | 5-30 °C (41-86 °F) 30-70% | 18-28 °C (64-82 °F) 20-80% | |
| Especificações elétricas | 100-240 VAC, 50/60 Hz, Single Phase, 4.0A | 100-240 VAC, 50/60 Hz, Single Phase, 15A/7.5A | 208/120 Vac, 3-phase Y, 60 Hz; 60A (max) | 100-240 VAC, 50/60 Hz, Single Phase, 4.0A |

2.3.3. Fluxo de trabalho de processos de fotopolimerização em câmara

Cada um dos métodos de impressão 3D requer uma preparação de instruções que são essenciais para a impressora, que variam de acordo com a tecnologia de impressão, modelo de impressora e material a utilizar. Como visto anteriormente, o ficheiro CAD é importado para o *software*, onde a peça é orientada na plataforma e posicionados os suportes de impressão.

Nestas tecnologias, os suportes são impressos no mesmo material que a peça e são necessários para garantir a posição da peça na plataforma de forma que esta não descole nem

empene. Neste momento, é preciso ter em consideração a geometria e detalhes da peça que se quer manter, sendo que as superfícies críticas não devem estar em contacto com o suporte, mas sim orientadas no sentido contrário. A orientação correta da peça vai determinar a quantidade de material consumido em forma de suporte e dado como desperdício no fim do processo [25]

De forma a consumir material de construção da peça em excesso e tempo e custo de impressão, as peças podem ser tornadas ocas. Contudo, é preciso garantir que os furos de saída de resina tenham no mínimo 4mm, para que não fique resina líquida não curada no interior dos modelos e que possam vir a deformar a peça com a pós-cura [25]

No fim da preparação do ficheiro no *software*, este é enviado para a impressora, onde é impresso camada a camada como explicado em cada tecnologia. Já na impressora, é feita a adição da quantidade necessária de resina no tabuleiro de resina (*Resin Tray*) da impressora, é agitado o material durante o tempo estipulado na ficha técnica do mesmo (estes dois processos podem ser invertidos tendo em conta o tempo que passou desde a última impressão) que fica pronto a imprimir.

Após a impressão, as peças são lavadas numa solução solvente como álcool isopropílico (para retirar qualquer resíduo de resina que não foi curada e que se mantém líquida à superfície da peça), são retirados os suportes de forma cuidada para não danificar a superfície da mesma e a peça é colocada na câmara de cura onde ganha as suas propriedades finais (que são as apresentadas nas fichas técnicas) e para que a peça final tenha resistência e estrutura para a sua aplicação, sendo que depois pode sofrer pós processamento (aprofundado no capítulo seguinte) [10]

2.3.4. Pós-processamento de processos de fotopolimerização em câmara

Após a impressão, as peças são lavadas numa solução solvente como álcool isopropílico (para retirar qualquer resíduo de resina que não foi curada e que se mantém líquida à superfície da peça), são retirados os suportes de forma cuidada para não danificar a superfície da mesma.

Para que todas as partes ainda moles solidifiquem na sua totalidade, são expostos a luz solar, luz negra, Diodo Emissor de Luz (LED - *Light Emitting Diode*), luz UV ou câmaras de cura UV, para aumentar a resistência mecânica da peça para a sua aplicação.

O tempo que a resina fica exposta à luz ultravioleta é *designado* como “tempo de exposição” e é um dos parâmetros que influencia as propriedades mecânicas durante a impressão e o processo de pós cura [26]. As razões pelas quais é utilizada cura UV devem-se às suas vantagens como cura rápida a temperatura ambiente, eficiência de espaço e energia, padrões de alta resolução e ainda formulações livres de solvente. Quando comparado com técnicas de secagem tradicionais, que dependem total ou parcialmente da evaporação de solventes, a cura UV permite uma solidificação rápida, alta resistência a solventes e emissões reduzidas de Compostos Orgânicos Voláteis (VOC - *Volatile organic compounds*) [27]

Quando são retirados ou cortados os suportes, a superfície da peça torna-se irregular e por isso é necessário ser tratado para obter uma superfície lisa e regular, não afetando a geometria da peça e a sua precisão dimensional. O uso de lixa permite uma melhor preparação da superfície para ser aplicada tinta ou *spray*. Neste processo, a água adicionada pode causar manchas brancas na peça, pelo que o uso de óleo minerais atribui um acabamento mais uniforme e lubrificado, contudo, este reduz o atrito das peças e a tinta pode não aderir com a mesma facilidade [28] [26]

Como as peças são sensíveis ao UV, podem ser aplicados sprays para proteger o modelo dos raios UV, prevenindo o amarelecimento de peças transparentes e deformação da peça. É preciso ter em conta a densidade do *spray* ou do verniz e a quantidade de camadas aplicadas, pois pode entrar em conflito com a dimensão da peça.

As peças transparentes precisam de um polimento mais rígido, que é adequado para formas mais simples, de fácil acesso e com pouco detalhes e pode não ser apropriada para as peças com geometrias complexas ou com detalhes pois passa a ser um processo demorado [29].

Em casos como necessidade de uma resistência superior, as peças podem passar por processos de galvanização (proteção contra corrosão pela adição de uma camada de zinco ou níquel), tornando-as também eletricamente condutivas e mais estáveis em termos de dimensões em ambientes mais húmidos [10]

Neste caso específico em que os materiais são escolhidos para aplicações médicas, estes devem ser sempre sujeitos a esterilização para garantir a segurança do paciente e do utilizador. Este processo pode ser feito em equipamentos como autoclaves ou através de exposição a raios gama e não apenas um desinfetante térmico. A esterilização é feita dentro uma bolsa própria na autoclave e submetida a uma temperatura de 121°C durante 15 minutos

ou de 138°C durante 3 minutos. Antes de ser usada, deve novamente passar por um período de repouso de temperatura ambiente [30].

2.4. Processos de Material Jetting (MJT)

Este último processo refere um método de impressão um pouco diferente dos anteriores no que toca à forma de construção e pós processamento da peça. Ainda assim, tem como base materiais fotopolimerizáveis.

2.4.1. MultiJet Printing

Entre os anos de 1980 e 1990, o MIT (Massachusetts Institute of Technology) desenvolveu uma forma de produção 3D através do uso de pó, camada a camada, utilizando um material ligante depositado por cabeças de impressão compostas por inúmeros *nozzles*. Este processo de impressão foi então patenteado com o nome de *Binder Jet*, tornando-se um dos métodos de fabrico aditivo conhecidos atualmente [8].

Este método que utiliza o pó como material de construção, foi adaptado para usar materiais fotopoliméricos como resinas com base em acrilato e ceras, com o auxílio de materiais de suporte (não tóxicos) para cumprir geometrias mais complexas, com características delicadas ou cavidades internas, dando origem à conhecida tecnologia MJP. A tecnologia MJP é conhecida por ser uma das com mais resolução, prometendo fidelidade ao CAD inicial, com facilidade em repetir os trabalhos de impressão com a mesma qualidade sem marcas de camadas, contudo, das mais lentas a nível de impressão [31]

Uma das grandes vantagens apresentadas a esta forma de produção é a possibilidade de imprimir com vários materiais diferentes, tornando concebível a impressão com várias cores na mesma impressão [8] Para além disto e lembrando o que foi dito inicialmente, esta tecnologia, pode imprimir peças para prototipagem rápida, para verificação de funcionalidade de *design* (geometria e dimensões), para encaixes rápidos, modelos de cera para fundição ou moldes, sendo a escolha para várias indústrias.

2.4.1.1. Funcionamento da tecnologia MJP

Como acontece com as outras tecnologias, o processo de impressão começa no *software* com o fatiamento do modelo em camadas com a altura de camada definida para o mesmo.

Como representado na Figura 8, na impressora de MJP, cada *nozzle* ou *jet* presente na cabeça de impressão piezoelétrica deposita líquido curável por UV, em forma de gota na plataforma de impressão, formando a camada de construção de acordo com o CAD previsto anteriormente [32]. A camada de material que vai sendo depositada, bem como a cera de suporte associada, vão sendo solidificadas através da passagem de uma luz ultravioleta. Uma vez terminada a camada, a plataforma desce e é alisada pelo *planarizer*, para preparar a próxima camada. Em alguns modelos da *3D Systems*, o *planarizer* está fixo e a mesa de impressão move-se para formar outra camada, noutros a plataforma está fixa e o *planarizer* é que se move [33].

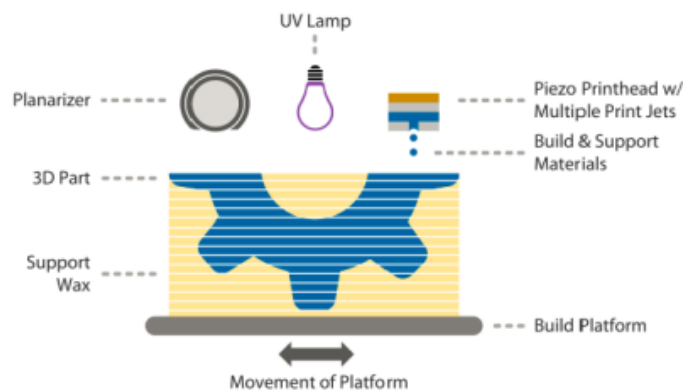


Figura 8 - Representação esquemática do processo de MultiJet Printing (MJP) [32]

O material de construção dentro da embalagem é sólido, que quando aquecido na impressora passa ao estado líquido até ser depositado na plataforma de impressão, onde ocorre uma mudança de estado devido ao arrefecimento do material. Ao solidificar rapidamente, a gota mantém a forma tempo suficiente até passar a luz UV que cura o material até à sua resistência máxima, estando a peça final completamente curada quando sai da impressora. A cera que vai suportando a construção em si, é fundida no pós-processamento, que irá ser abordada mais a frente [11].

As impressoras que permitem o uso de mais do que um material de impressão em simultâneo em várias zonas da mesma peça, como é sugerido na Figura 9, permitem a produção de peças mais complexas e funcionalizadas. Ao utilizar várias cores, pode ser impresso um modelo colorido ou com um gradiente de cores. Ao utilizar materiais diferentes, estes podem ser misturados, fazendo com que o modelo final tenha novas propriedades mecânicas como por exemplo novas durezas *Shore* nos materiais elastoméricos.

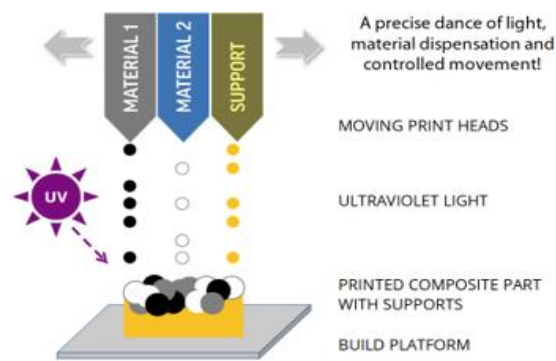


Figura 9 - Representação esquemática do processo de multi-material de MultiJet Printing (MJP)

Como mostra na Figura 9, os materiais vão sendo depositados e a luz UV solidifica a camada de material misturado, tal como se fosse apenas usado um material de impressão.

2.4.1.2. Equipamentos disponíveis para MJP

A *3D Systems* tem várias impressoras de MJP à disposição (Figura 10) para acelerar o desenvolvimento do produto, oferecendo possibilidades de precisão com altas velocidades de impressão e de fácil e simples operação para mais produtividade nos trabalhos a realizar.

As principais opções passam pela *ProJet MJP 2500/2500 Plus* que permite o uso de umas amplas e versáteis materiais plásticos da marca sendo que a segunda dispõe de mais materiais rígidos e com cores alternativas e propriedades que imitam plásticos de engenharia, elastômeros e com resistência a altas temperaturas. A *ProJet MJP 5600* com vários modos de impressão, para projetos de maiores dimensões e com a funcionalidade de conseguir misturar vários materiais na mesma impressão, para adquirir novas cores e/ou propriedades mecânicas. A *ProJet MJP 2500 IC (industrial casting)* para fundição e peças menos detalhadas e a *ProJet MJP 2500W Plus* limitada a projetos que utilizem cera como material (como é o caso da criação de joias), que requerem maior detalhe [33]

Podemos ver observar as principais diferenças entre estas impressoras, através da Tabela 4.



Figura 10 - Impressoras de produção em DLP [33]

Tabela 4 - Propriedades das impressoras de processamento de DLP [33]

| Propriedades | ProJet MJP 2500 Plus | ProJet MJP 2500 IC | ProJet MJP 2500W Plus | ProJet MJP 5600 |
|---|---|---|---|--|
| Modo de impressão | HD – Alta definição UHD – Ultra alta definição | HD – Alta definição UHD – Ultra alta definição | XHD ZHD | HD – Alta definição UHD – Ultra alta definição XHD – Alta definição Xtreme XHDS – alta definição Xtreme |
| Volume de construção | 294 x 211 x 144 mm | 294 x 211 x 144 mm | 294 x 211 x 144 mm | 518 x 381 x 300 mm |
| Resolução | HD – 800 X 900 X 790 DPI ; 32µm UHD – 1600 X 900 X 890 DPI ; 32 µm | 600 x 600 x 600 DPI ; camada 42 µm | XHD - 1200 x 1200 x 1600 DPI; camada 16 µm ZHD - 1200 x 1200 x 3200 DPI, camada 8 µm | UHD e UHDS – 600 X 600 X 1600 DPI , camada 16 µm; XHD e XHDS – 750 x 750 x 2000 DPI, camada 13 µm |
| Precisão | 0,025 – 0,05mm/ 25,4mm | ± 0,1016mm/25,4mm ± 0,0508mm/25,4mm | ± 0,1016mm/25,4mm ± 0,0508mm/25,4mm | 0,025 – 0,05mm/ 25,4mm |
| Condições ambiente operacional - Temperatura - Humidade | 18-28 °C (64-82 °F) 30-70 % relative humidity | | | |
| Especificações elétricas | 100-127 VAC, 50/60 Hz, 15A, single-phase 200-240 VAC, 50/60 Hz, 10A, single-phase 1 | | | 100-127 VAC, 50/60 Hz, 20A, single-phase 200-240 VAC, 50/60 Hz, 10A, single-phase |

2.4.2. Fluxo de trabalho do processo de *MultiJet Printing*

O *software* de *3D Sprint* que foi mencionado no início deste documento e que acompanha estas impressoras tem a opção de “*high-density nesting*” que faz o posicionamento correto das peças a imprimir ao longo da plataforma de forma eficiente. As plataformas de impressão de MJP estão divididas em três zonas/bandas, consoante o número e dimensão das peças. Uma ou duas zonas podem ser desativadas e posicionadas apenas ao longo de uma delas, o que aumenta a velocidade de impressão pelo movimento da cabeça de impressão e diminui a quantidade de suporte usada [32]

Neste processo, para a impressão, é adicionada uma “*test strip*” na extremidade, por cada camada de impressão, fazendo com que todos os *jets* sejam utilizados para manter a performance da máquina e para identificar possíveis problemas na impressão ou na impressora.

2.4.3. Pós-processamento do processo de *MultiJet Printing*

Uma das grandes vantagens da tecnologia é não ser necessário grande trabalho manual no pós-processamento. Inicialmente são retiradas as peças da plataforma, muitas vezes é colocada a plataforma no congelador ou com a ajuda de uma pistola de ar quente, pois a primeira camada é retirada com mais facilidade com a mudança de temperatura [34]

Como foi explicado anteriormente, a tecnologia de MJP usa uma cera de suporte que tem de ser retirada no fim de impresso o modelo. O facto de o suporte ser fundido e não partido, permite que as peças possam ter geometrias mais complexas e com mais cavidades interiores de difícil acesso, pois a cera irá fluir sem problemas devido à diferença dos pontos de fusão dos materiais, não danificando peças mais frágeis.

Neste processo, as peças são retiradas da plataforma e colocadas no *Easyclean system*, que remove a cera de suporte em aproximadamente 30 minutos. O equipamento *EasyClean* é formado por dois modos de limpeza com base em calor, o *steam mode* (modo vapor) e o *oven mode* (modo forno) que se complementam. O primeiro usa vapor (a 100°C) para libertar a cera mais rígida, posteriormente o calor (a sensivelmente 65°C com a ajuda de um solvente, por norma um óleo mineral ou *EZ Rinse-C*) atua na zona com maior detalhe, em contacto com a peça. Se ainda restar cera de suporte em peças mais finas ou pequenas e em situações de canais onde é posicionado suporte para impressão, esta pode ser dissolvida num tanque de ultrassons por incluir agitação neste processo [35] [34].

No fim de limpos com água morna e sabão (pois não deve haver uma mudança de temperatura repentina) e de secos, os modelos impressos podem ser facilmente acabados com pintura ou colagem, instalados e usados para testes de funcionalidade [34].

2.5. Materiais fotossensíveis

Para cada uma das tecnologias mencionadas ao longo do documento, percebe-se que são necessárias impressoras diferentes, que trabalham de forma restrita com o grupo de materiais mencionados no presente capítulo seguinte, sendo que estão disponíveis para produzir o mais variado tipo de peças para prototipagem.

Os diferentes métodos de impressão 3D de SLA, DLP e MJP, utilizam materiais fotopolimerizáveis para a construção de modelos 3D, com vários parâmetros de impressão diferentes. Assim, para estes materiais que usam comprimentos de onda entre 365nm e 450nm, há parâmetros que diferem devido a fatores como viscosidade, densidade da resina ou absorção da luz (pela penetração da mesma) e pela energia fornecida ao material para realizar a polimerização das várias camadas. A viscosidade das resinas é determinada pela mistura de monómeros, tal como a sua mistura com os fotoiniciadores e a reatividade da resina afeta a velocidade de impressão e a necessidade de pós cura [8].

Uma das vantagens do SLA e do DLP é a ampla gama de resinas que podem ser utilizadas, cada uma delas com propriedades mecânicas, térmicas e resistência diferentes semelhantes a outros termoplásticos que podem ser usados em várias indústrias. É também comum que se fabriquem resinas com adição de partículas metálicas ou cerâmicas que precisam de um tratamento térmico após a impressão [36]. Já no caso da MJP, disponibiliza não só as resinas com base em acrilato para aplicações de engenharia, como ceras para fundição com propósitos como a joalheria.

Estão por isso disponíveis materiais similares a materiais tipicamente utilizados na injeção, aptos para montagens de encaixe rápido, para aplicações com altas temperaturas ou onde seja necessária transparência na aparência e que tenham resistência e durabilidade. Por exemplo, materiais como o Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS - *Acrylonitrile Butadiene Styrene*), Polipropileno (PP – *polypropylene*) ou Policarbonato (PP – *polycarbonate*) estão disponíveis. Há ainda a possibilidade de produção de peças para fundição de joias e de peças para fundição de metal. Para além disto, estas tecnologias oferecem soluções biocompatíveis adequadas a aplicações médicas como aparelhos ortodônticos ou auditivos ou instrumentos cirúrgicos [10]

Para além disso, as tecnologias de MJP e DLP oferecem a possibilidade de imprimir em materiais elastoméricos para funcionalidades semelhantes à da borracha. Por último e devido à capacidade da mesma, a tecnologia de MJP consegue misturar vários materiais na mesma impressão para obter peças com características e desempenho personalizadas [33]

Dito isto, uma vez que o estudo tem como base os produtos da *3D Systems*, esta disponibiliza na totalidade 20 resinas para DLP, 22 para impressoras de SLA e 36 para MJP com mais variedade, sendo que podem diferenciar consoante a impressora escolhida. No site oficial da *3D Systems*, na secção de escolha de material, é possível escolher os materiais adequados para a aplicação desejada, de acordo com alguns filtros como “impressora”, “tecnologia”, “aplicação”, “tipo de material”. A Tabela 5 que se segue mostra algumas das resinas que se inserem nos diferentes tipos de materiais, consoante a aplicação desejada.

Tabela 5 - Consumíveis de SLA, DLP e MJP por tipo de material

| Tipo de material | SLA | DLP | MJP |
|--|---|--|--|
| ABS-semelhante | Accura AMX High Temp 300C Accura AMX Tough FR V0 Black | Figure 4 Tough Clear Figure 4 Tough 60C White Figure 4 Tough 65C Black | VisiJet Armor Max (M2G-JF) |
| Capacidade Biocompatível | Accura AMX Rigid Black Accura ABS White (SL 7810) Accura ClearVue | Figure 4 Tough 60C White Figure 4 Rigid White Figure 4 RUBBER-65A BLK Figure 4 RUBBER-BLK 10 Figure 4 PRO-BLK 10 Figure 4 MED-WHT 10 Figure 4 MED-AMB 10 | VisiJet M2P-CST Crystal™ VisiJet M2E-BK70 (MJP) VisiJet M2S-HT250 (MJP) VisiJet M2R-GRY (MJP) VisiJet CR-BK (MJP) VisiJet M2R-CL (MJP) VisiJet M2R-TN VisiJet M2R-TN (Dental) VisiJet M3 Crystal (MJP) VisiJet CR-WT 200 (MJP) VisiJet CR-CL 200 (MJP) |
| Fundição | Accura Sapphire Accura CastPro Accura 60 Accura ClearVue | Figure 4 JCAST-GRN 20 Figure 4 EGG SHELL-AMB 10 | VisiJet M2P-CST Crystal™ VisiJet Wax Jewel Ruby (MJP) VisiJet Wax Jewel Red (MJP) VisiJet Support Wax Remover (MJP) VisiJet M2 iCast (MJP) VisiJet M2 CAST (MJP) VisiJet M3 CAST (MJP) VisiJet M3 Hi-Cast (MJP) VisiJet M3 Procast (MJP) |
| Elastoméricos | | Figure 4 RUBBER-65A BLK Figure 4 RUBBER-BLK 10 | VisiJet M2E-BK70 (MJP) VisiJet M2 ENT (MJP) VisiJet M2 EBK (MJP) VisiJet CE-NT (MJP) VisiJet CE-BK (MJP) |
| Altas temperaturas | Accura HPC Accura Phoenix Accura SL 5530 Accura PEAK Accura Bluestone | Figure 4 High Temp 150°C FR Black Figure 4 JEWEL MASTER GRY Figure 4 HI TEMP 300-AMB Figure 4 MED-WHT 10 Figure 4 MED-AMB 10 | VisiJet M2S-HT250 (MJP) VisiJet M2S-HT90 (MJP) VisiJet M3-X (MJP) |
| Rígidos – com semelhanças ao policarbonato ou uretano | Accura AMX Rigid Black Accura SL 5530 Accura CastPro | Figure 4 High Temp 150°C FR Black Figure 4 Rigid Gray Figure 4 Rigid White Figure 4 PRO-BLK 10 | VisiJet M2R-TN VisiJet M3 Crystal (MJP) VisiJet CR-WT 200 (MJP) |

Como será abordado mais a frente, o material escolhido vai depender da aplicação selecionada, bem como as propriedades necessárias para responder aos requisitos da solução. Dos materiais apresentados na Tabela 5, serão retirados em primeira instância os elastoméricos e os de fundição, sendo que os restantes terão características interessantes para a produção de uma ortótese.

2.6. Distinção de tecnologias, análise comparativa

Para as três tecnologias apresentadas, é necessário que a resina líquida, sofra algum tipo de exposição à luz UV para que possa ser curada e ficar sólida. Contudo, este processo tem fontes de luz diferentes, com diferentes comprimentos de onda e diferentes velocidades para

completar esse processo, que está diretamente relacionado com a precisão da camada a solidificar, o que afeta a qualidade ou suavidade da superfície da peça final. Esta diferenças técnicas entre as tecnologias de impressão podem ser resumidas na Tabela 6.

Tabela 6 - Principais diferenças técnicas das tecnologias de impressão a estudar

| | SLA | DLP | MJP |
|--------------------------|---|---|---|
| Fonte de luz UV | Laser UV | Projetor com luz UV | Luz UV |
| Comprimento de onda [37] | 355nm | 405nm | 190-400nm |
| Modo de construção | Ponto a ponto | Camada a camada | Múltiplos jatos que depositam material fotopolimérico |
| Velocidade | •• | ••• | ••• |
| Suavidade da superfície | •• | • | •• |
| Principais vantagens | <ul style="list-style-type: none"> • Superfície extremamente lisa • Alta precisão dimensional • Boa para detalhes finos | <ul style="list-style-type: none"> • Velocidade superior ao SLA • Boa qualidade superficial • Custo mais acessível | <ul style="list-style-type: none"> • Múltiplos materiais • Múltiplas cores • Suportes solúveis • Acabamento excelente |
| Principais desvantagens | <ul style="list-style-type: none"> • Velocidade mais lenta • Custo elevado • Exige pós-processamento • Limitação de materiais | <ul style="list-style-type: none"> • Resolução limitada pelo projetor • Vida útil da lâmpada • Menos precisão que SLA • Exige pós-processamento • Limitação de materiais • Tamanho reduzido | <ul style="list-style-type: none"> • Equipamento muito caro • Materiais limitados • Manutenção complexa |

Dos processos apresentados, todos têm a capacidade de apresentar peças finais com alto detalhe, mesmo em *designs* mais complexos. Ainda assim, existem diferenças significativas no que toca a qualidade de impressão destas tecnologias. Especificamente entre SLA e DLP, estas diferem no que toca à fonte de luz (Figura 11), enquanto o SLA utiliza um espelho para refletir o feixe de laser, o DLP usa o projetor de luz digital que irá influenciar a resolução da camada [6].

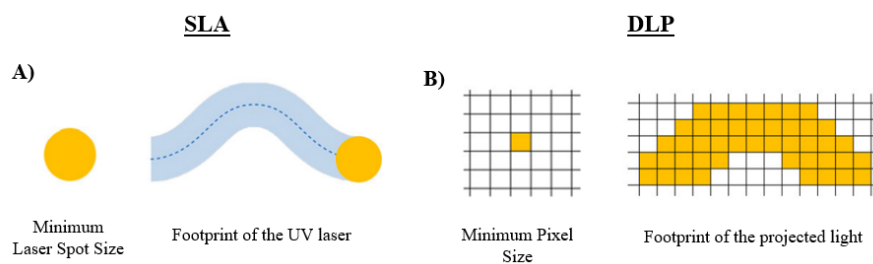


Figura 11 - Comparação do acabamento das camadas devido à diferença entre fontes de luz. A) SLA. B) DLP [6]

Em particular no SLA, a resolução depende do tamanho do ponto focal do laser usado, por isso a qualidade varia consoante os equipamentos usados e tamanho das impressões a realizar. Pela mesma razão, o tamanho de impressão é grande, mas a qualidade de impressão é menor [38]

No que toca à superfície de impressão e fazendo referência à Figura 11, o DLP tem uma maior probabilidade de que se notem as secções transversais devido à pixelização da imagem, já o SLA conta com o varrimento do laser de forma suave, permitindo uma melhor superfície [6]. Contudo, o MJP é a que permite melhor acabamento por se tratar de uma tecnologia de deposição de material por microjatos, que é curado rapidamente, evitando grandes deformação da geometria pretendida.

Relativamente à velocidade de impressão, o processo de DLP e MJP são mais rápidos, uma vez que cada camada impressa é completamente e imediatamente exposta à luz UV. O SLA demonstra ser o mais lento, uma vez que a cura do material é feita ponto a ponto e depende do tamanho da peça e do consequente movimento do feixe laser [6].

Um dos principais fatores que pode afetar qualquer uma das tecnologias acima referidas, é a contração que os materiais podem sofrer durante ou após a impressão, o que resulta numa diminuição da precisão dimensional [38]

No que diz respeito ao pós-processamento, torna-se uma desvantagem para as tecnologias de SLA e DLP por ser necessário remover o material de suporte e ainda suavizar a superfície que esteve em contacto com os mesmos, o que leva a um consumo de tempo que não seria necessário ao usar a impressão por MJP. Uma desvantagem comum às 3 tecnologias, é o facto de nenhuma ser reciclável quando o propósito não é cumprido, o que significa que erros de impressão ou até mesmo o material de suporte são desperdício e um risco para o ambiente se não forem devidamente encaminhados. Ainda assim, permitem uma redução de custos de material, uma vez que aquele que não é solidificado permanece no tabuleiro de impressão para que possa ser usado posteriormente [38]

As peças, quando expostas a longos períodos de exposição solar, podem vir a deteriorar-se ao nível da aparência e da sua resistência por se tratar de materiais fotossensíveis. A maior desvantagem da tecnologia de DLP em comparação com a restantes é o tamanho das impressoras (como foi demonstrado no capítulo anterior), o que compromete o tamanho das peças que as impressoras conseguem produzir [36]

As resinas fotopoliméricas devem ter uma viscosidade baixa, pois a alta viscosidade (por norma em resinas com maior elasticidade) está associada a um alto peso molecular, o que põe em causa o bom desempenho da resina, principalmente porque aumenta a possibilidade de contração das peças [38]

3. Materiais e métodos

Neste capítulo, são introduzidos os materiais e é apresentada a metodologia de criação e personalização de uma ortótese para uma paciente com necessidades de estabilidade do antebraço enquanto trabalha num escritório.

3.1. Processo de customização de ortóteses

A posição ergonómica normal de trabalho numa secretária em situação de escritório implica que o braço esteja apoiado na secretária para escrever ou teclar. A paciente apresentava um nódulo localizado na parte interior do antebraço, que coincidia com a zona de apoio na secretária, o que causava algum desconforto e dor após algumas horas de trabalho. Por este motivo, surge a ideia de desenvolver um dispositivo que sustente e equilibre este apoio na mesa. A partir do processo de Engenharia Inversa da anatomia da paciente, criou-se uma ortótese de forma a aliviar o desconforto e dor nessa área.

3.1.1. Aquisição de informação e preparação de modelos 3D

Numa primeira fase, o objetivo foi proceder à digitalização anatómica do antebraço da paciente com a ajuda do *scanner Einscan Pro Plus (Shininig 3D)*, que permitiu capturar toda a geometria orgânica do braço (Figura 12). Devido à falta de sustentação do braço durante o processo de digitalização, este teve de ser repetido, uma vez que o *scanner* é sensível a pequenos movimentos involuntários que fazem perder o ponto de referência durante alguma fase da digitalização. Depois de finalizado o processo, é possível criar uma nuvem de pontos que posteriormente dá origem a uma malha de triângulos (obtida por um alinhamento ideal ao longo do segmento), que irá permitir a continuação do processo de criação.



Figura 12 - Digitalização do antebraço.

Com a obtenção de um ficheiro .STL gerado pela digitalização, o modelo foi importado para o *software Geomagic Design X 2022* onde foi realizada a modelação da superfície e tratamento da mesma. Numa primeira fase removeram-se triângulos que se encontravam sobrepostos e também a informação irrelevante para a produção da ortótese (como por exemplo, parte da camisola que foi digitalizada por lapso).

De seguida fez-se o preenchimento de furos e suavizaram-se certas áreas de contacto ou de erro de leitura. Por fim, fechou-se a zona do cotovelo e ocultaram-se os dedos que não seriam necessários para a produção da ortótese. (Figura 13, 14, 15, 16 e 17).

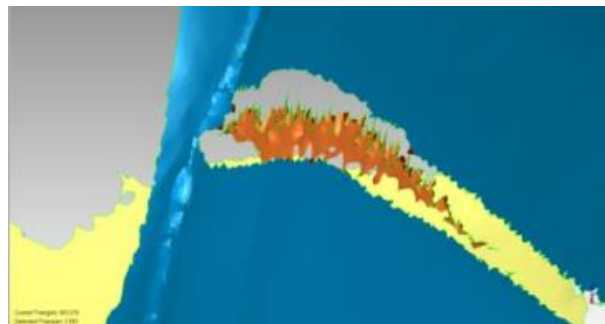


Figura 13 - Remoção de triângulos da superfície

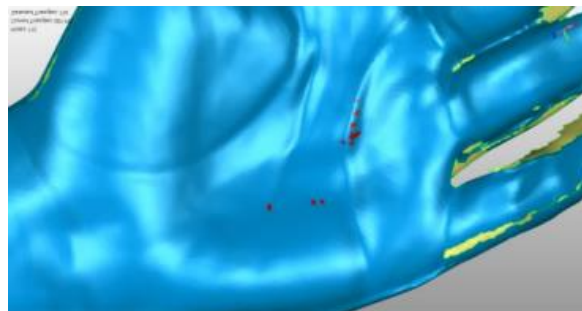


Figura 14 - Preenchimento de furos

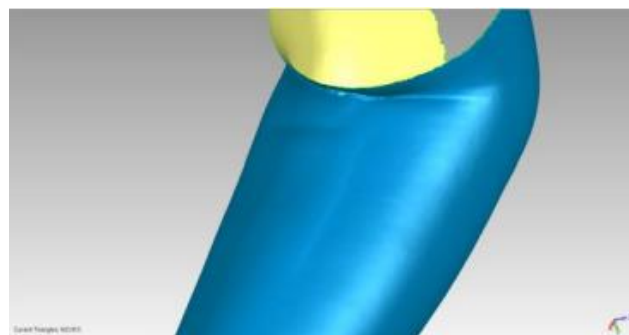


Figura 15 - Suavização da área

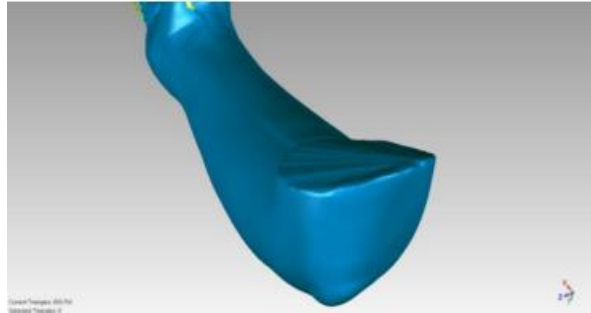


Figura 16 - Superfície do cotovelo fechada



Figura 17 - Superfície da mão fechada

Após este processo foi criado um modelo de superfícies (Figura 18) para ser importado no *SolidWorks 2022*.

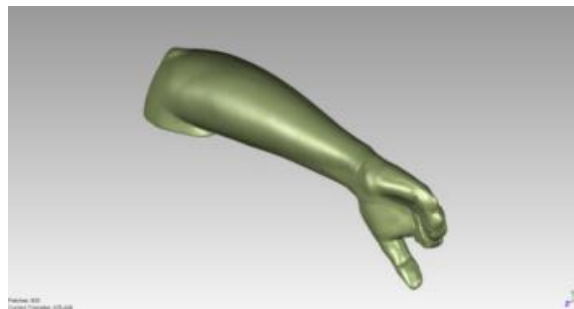


Figura 18 - Modelo de superfícies

Através do *software SolidWorks*, foi criada uma estrutura junto ao braço, de modo a dar origem ao corpo da ortótese, dando um espaçamento de 1mm entre o dispositivo e a área de interesse para que a ortótese não exerça uma pressão negativa no braço do paciente. Uma vez que esta seria apenas para ser utilizada em contexto de escritório, quando o antebraço se encontra apoiado na secretária ou noutra superfície, decidiu-se criar encaixes para que a ortótese se pudesse dividir em dois modelos de modo a facilitar a colocação e remoção da mesma e para que o paciente seja o mais independente possível. O desafio de modulação reside nos encaixes, por terem de acompanhar a curvatura orgânica do antebraço, nunca sendo uma superfície linear e de fácil implementação (Figura 19).

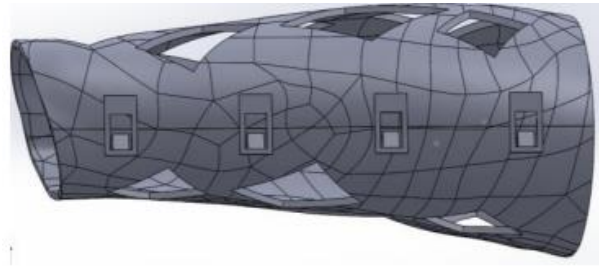


Figura 19 - Encaixes idealizados para a ortótese

Por fim, para que esta não se tornasse uma peça completamente fechada e fosse arejada para não acumular suores ou outras partículas e foram projetados cortes em losangos segundo o *design* pretendido pelo paciente (Figura 20) sendo que qualquer uma poderia ser escolhida por parte do mesmo. Esta geometria em específico facilita a impressão no que toca a criação de suportes (que em algumas tecnologias pode ser opcional) e quando combinada com uma boa posição na plataforma impressão, pode fazer diferença nos materiais escolhidos e no tempo de impressão.

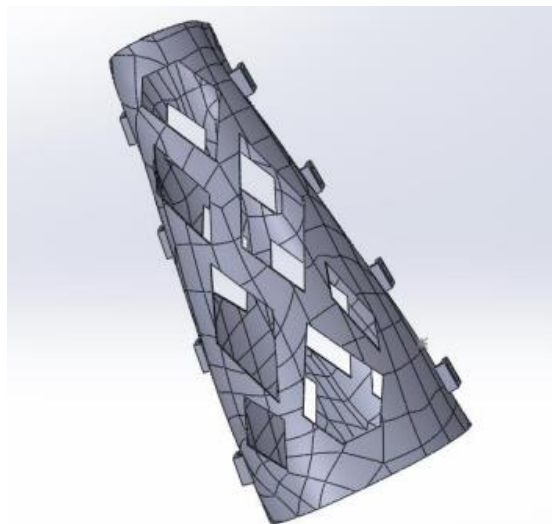


Figura 20 - *Design* de losangos utilizado na modelação da ortótese

O modelo final da ortótese ficou com as dimensões apresentadas na Figura 21, sendo elas aproximadamente 90 x 98 x 209mm de comprimento e 2.5mm de espessura. Esta espessura é selecionada como um compromisso entre flexibilidade e rigidez, garantindo conforto ao utilizador e mantendo a peça relativamente leve.

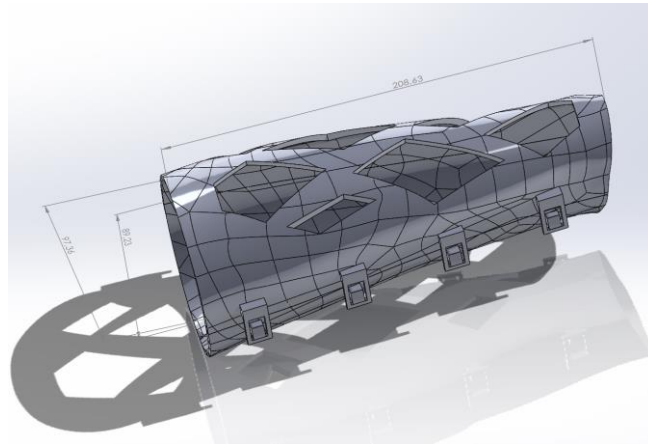


Figura 21 - Dimensões finais da ortótese

Este modelo em formato .SLDPRT foi exportado para formato .STL para possibilitar as simulações no *software* que acompanha a *3D Systems*, o *3D Sprint 4.3.0*, que contém os parâmetros de impressão das tecnologias já mencionadas para este estudo.

3.1.2. Impressão de protótipos 3D

No *software 3D Sprint* é importado o ficheiro criado da ortótese dividida em dois, é orientada na plataforma e são colocados os suportes de forma automática ou estratégica, definida pelo utilizador, o que já exige algum nível de conhecimento e experiência.

Através do estudo das tecnologias, pondera-se a produção desta ortótese para uso em contacto direto com a pele e outra para uma ortótese externa, utilizando uma manga intermediária, ideia demonstrada na Figura 22. Na ortótese de contacto direto, consideraram-se as características de biocompatibilidade, conforto e flexibilidade adequada.

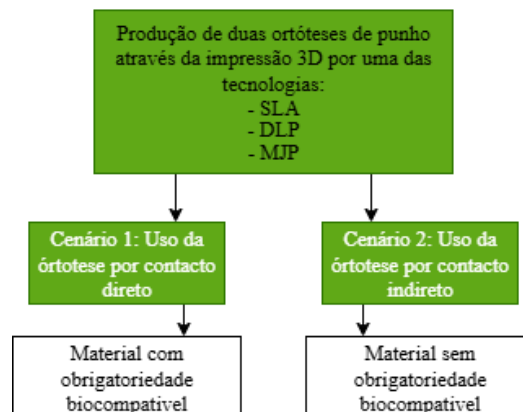


Figura 22 - Fluxograma de produção com e sem requisito de biocompatibilidade

Na necessidade de ser colocada uma manga intermediária, é recomendado que haja um espaçamento maior entre a pele e a ortótese para que não haja desconforto. Para além disto,

o tecido deverá ser uma malha respirável com tratamento antimicrobiano, e material resistente à humidade e que auxilie no controlo da mesma.

3.2. Seleção de materiais e equipamentos para impressão de protótipos

No site oficial da *3D Systems*, na secção de escolha de material, é possível escolher os materiais adequados para a aplicação desejada, de acordo com alguns filtros como “impressora”, “tecnologia”, “aplicação”, “tipo de material”.

3.2.1. Seleção de equipamentos de impressão

Com base em todos os equipamentos apresentados, entende-se que em cada uma das tecnologias apresentadas há algumas hipóteses que podem ser excluídas para o propósito deste trabalho como é o caso das impressoras de grandes dimensões (sendo para produção de protótipos customizáveis, não faz sentido produzir industrialmente) e as impressoras para produção de joias ou para consumíveis de cera.

Para além disto, e como vai ser mencionado mais a frente, para a escolha da impressora foram consideradas as possíveis orientações do modelo na plataforma de cada uma, bem como considerados os respetivos materiais disponíveis e compatíveis, o que fez excluir a impressora *ProJet MJP 5600* (só com 6 materiais disponíveis) para a tecnologia de MJP.

No que toca à tecnologia de DLP, a ortótese tem o comprimento superior à altura de impressão disponível da impressora *Figure 4 Standalone*, como se pode ver nas Figuras 23 a e b.

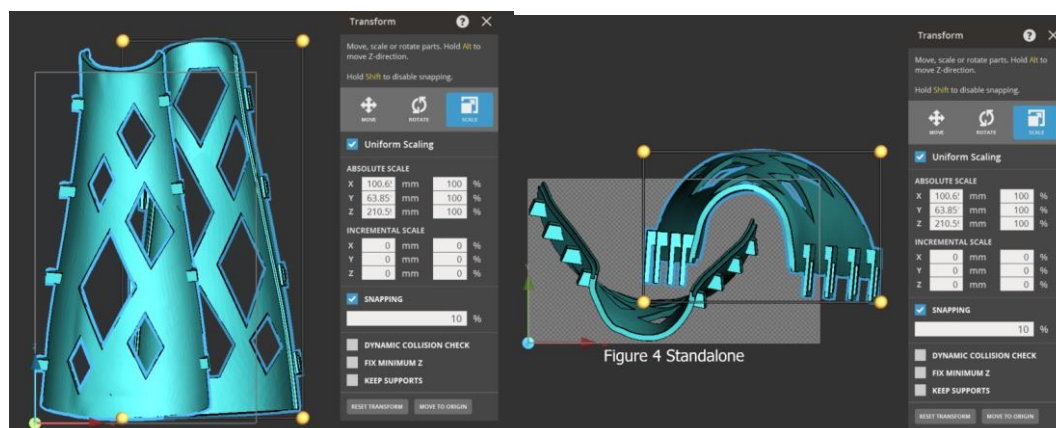


Figura 23 - Impossibilidade de encaixe da ortótese da impressora *Figure 4 Standalone*

Observa-se, que não cabe dentro do volume útil da impressora, pelo que esta não foi considerada para as simulações nos vários materiais. Ainda assim, para uma possível

ortótese para uma criança, que tem o antebraço mais pequeno, talvez esta fosse uma opção a ter em conta. Para além da altura insuficiente, não é possível imprimir as duas partes em simultâneo.

Assim sendo, na Tabela 7 são apresentadas as impressoras consideradas para cada tecnologia.

Tabela 7 - Impressoras selecionadas para cada tecnologia para o estudo de impressão

| | DLP | SLA | | MJP |
|-----------------------------|---|--|----------------------|--|
| Impressora | <i>Figure 4 Modular</i> | <i>ProJet 6000HD</i> | <i>ProJet 7000HD</i> | <i>ProJet MJP 2500Plus</i> |
| Volume máximo de construção | 124.8 x 70.2 x 346 mm | 250 x 250 x 250 mm | 380 x 380 x 250 mm | 294 x 211 x 144 mm |
| Resolução | 1920 x 1080 pixels, 25-80 µm layers | HD - 0.125 mm, 0.125 mm layers UHD - 0.125 mm, 0.100 mm layers XHD - 0.075 mm, 0.050 mm layers | | 800 x 900 x 790 DPI, 32 µm layers |
| Precisão | *1 | 0.025-0.05 mm per 25.4 mm of part dimension ³ | | ±0.001-0.002 inch per inch (0.025-0.05 mm per 25.4 mm) of part dimension (on platform) Accuracy may vary depending on build parameters, part geometry and size, part orientation and post processing |
| Pós-processamento | Limpeza, (IPA, Easy Rinse C, TPM), secagem e cura (Unidade 350 de cura UV do Figure 4 ou LC-3DPrint Box (para a cura de peças impressas com uma altura Z de até 195 mm) | UV Curing Units, Parts Washer and Right Height Table, ProJet® Cart Station | | MJP EasyClean System or ProJet Finisher for easy removal of eco-friendly wax supports |

3.2.2. Seleção de materiais de impressão

No que diz respeito aos materiais, considerando os vários disponíveis para cada tecnologia, é necessário selecionar as resinas que devem ser efetivamente apontadas para o procedimento experimental. Assim sendo, para cada tecnologia são usados os mesmos filtros, com o objetivo de encontrar materiais com o mesmo potencial para impressão no contexto deste estudo.

Inicialmente são considerados todos os materiais de cada tecnologia, em segundo lugar são filtrados pelas impressoras eleitas para simulação na Tabela 7. Uma vez que para a tecnologia de SLA foram selecionadas duas impressoras, a resina adicional (*Accura AMX Rigid Composite White*) não é considerada para o estudo por não ser compatível com uma delas. Posteriormente são filtrados e excluídos os materiais que não se ajustam à finalidade da ortótese, materiais demasiado flexíveis como borrachas e elastoméricos, bem como com a finalidade de fundição ou odontologia.

¹ não há especificação por parte do fabricante em relação à precisão devido ao tipo de resina utilizada.

A *3D Systems* dispõe de uma página de localizador de materiais (*material finder*) onde podem ser filtrados alguns parâmetros como a “tecnologia” a usar, a “impressora” pretendida e aplicados alguns filtros no tipo de material como “Biocompatibilidade”, “semelhantes a ABS”, “durável, semelhante ao polipropileno”, “rígido, semelhante a policarbonato e uretano”, “resistente e durável”, “resistente semelhante a ABS”, “semelhante a policarbonato”, mostrados na Figura 24, para determinar quais os materiais a serem mais detalhadamente analisados através da *datasheet* [39].

| Filter By: | | Material Type | |
|---|----|--|----|
| Printer | — | <input type="checkbox"/> ABS and ABS-like | 6 |
| Search 3D Printers | X | <input type="checkbox"/> Biocompatible Capable | 14 |
| <input type="checkbox"/> Figure 4 135 | 10 | <input type="checkbox"/> Castable Plastics | 4 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Figure 4 Modular | 19 | <input type="checkbox"/> Composite | 2 |
| <input type="checkbox"/> Figure 4 Production | 18 | <input type="checkbox"/> Durable - Polypropylene-like | 5 |
| <input type="checkbox"/> Figure 4 Standalone | 21 | <input type="checkbox"/> Elastomer / Rubber-like | 5 |
| <input type="checkbox"/> MJP 300W | 4 | <input type="checkbox"/> General purpose | 13 |
| <input type="checkbox"/> NextDent 300 | 1 | <input type="checkbox"/> High temperature | 6 |
| <input type="checkbox"/> PSLA 270 | 9 | <input type="checkbox"/> Investment Casting | 2 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Projet 6000 HD | 11 | <input type="checkbox"/> Jewelry Casting/Master Pattern | 2 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Projet 7000 HD | 12 | <input type="checkbox"/> Master Pattern | 1 |
| <input type="checkbox"/> Projet MJP 2500 IC | 2 | <input type="checkbox"/> Metal Casting | 1 |
| <input type="checkbox"/> Projet MJP 2500 Plus for Dental | 1 | <input type="checkbox"/> Plastic | 42 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Projet MJP 2500/2500 Plus | 12 | <input type="checkbox"/> Rigid - Polycarbonate-like, Urethane-like | 8 |
| <input type="checkbox"/> Projet MJP 2500W Plus | 4 | <input type="checkbox"/> Tough and Durable | 8 |
| <input type="checkbox"/> Projet MJP 3600 Dental | 3 | <input type="checkbox"/> Tough - ABS-like | 17 |
| <input type="checkbox"/> Projet MJP 3600 Series | 7 | <input type="checkbox"/> Translucent | 3 |
| Show more | | <input type="checkbox"/> Transparent | 3 |
| Technology | — | <input type="checkbox"/> Transparent / Translucent | 7 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Figure 4 | 19 | <input type="checkbox"/> Transparent, polycarbonate-like | 3 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Multijet Printing | 12 | | |
| <input type="checkbox"/> PSLA | 9 | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> Stereolithography | 12 | | |

Figura 24 - Possíveis filtros pelo *Material Finder* da *3D Systems* [39]

Uma vez que se trata de um produto que pode ou não estar em contacto direto com a pele, é necessário que o mesmo seja biocompatível. Biocompatibilidade é a capacidade que o material tem para desempenhar uma função específica num determinado órgão ou tecido biológico com uma resposta apropriada. O biomaterial biocompatível obriga a que não seja antigénico, carcinogénico, mutagénico ou tóxico [40].

O PP, conhecido por ser um material de baixa densidade com boa resistência ao impacto e à fadiga e com boa estabilidade dimensional [41]. O PC é um material por norma transparente e leve devido ao carbono da sua constituição, tem alta rigidez e resistência mecânica e resistência ao impacto com boa estabilidade dimensional [42]. Em semelhança, o ABS é caracterizado pela sua boa resistência mecânica e ao impacto, com boa flexibilidade, tem boa estabilidade dimensional (embora a sua porosidade possa influencia a adesão entre

camadas e provocar alguns empenos principalmente noutra tipo de tecnologias de impressão) [43].

Assim sendo, na Tabela 8 são apresentados os materiais considerados para cada tecnologia e as características comuns para cada um, usadas para filtragem.

Tabela 8 - Materiais selecionados e características comuns para cada tecnologia para o estudo de impressão

| SLA | Características comuns | DLP | Características comuns | MJP | Características comuns |
|-------------------------------------|---|-------------------------------|--|----------------------------|---|
| Accura AMX High Temp 300C | -Rígido ABS semelhante, -ABS semelhante -Durabilidade | Fig 4 Tough Clear | - ABS semelhante Rígido ABS semelhante - Rígido e durável -Policarbonato semelhante | VisiJet Armor Max (M2G-JF) | ABS semelhante |
| Accura AMX Tough FR V0 Black | -Rígido ABS semelhante, -ABS semelhante -Durabilidade | Fig 4 Tough 60C White | - ABS semelhante - Rígido ABS semelhante - Rígido e durável - Biocompatível | VisiJet ProFlex (M2G-DUR) | - Durável (polipropileno semelhante) |
| Accura Xtreme white 200 | Rígido ABS semelhante | Fig 4 Tough 65C Black | ABS semelhante Rígido ABS semelhante Rígido e Durável | VisiJet M2R-TN | -Rígido (Policarbonato e uretano semelhante) - Biocompatível |
| Accura Xtreme | Rígido ABS semelhante | Fig 4 Tough FR V0 Black | Rígido ABS semelhante - Durável (polipropileno semelhante) Rígido e Durável | VisiJet M2R-GRY | - Rígido ABS semelhante - Biocompatível |
| Accura ABS Black | Rígido ABS semelhante | Fig 4 Tough-BLK 20 | Rígido ABS semelhante - Durável (polipropileno semelhante) | VisiJet Armor (M2G-CL) | - Rígido ABS semelhante |
| Accura AMX Durable Natural | -Durável (polipropileno semelhante) -Rígido ABS semelhante | Fig 4 Tough-Gry 15 | Rígido ABS semelhante | VisiJet M2R-CL | - Policarbonato semelhante - Biocompatível |
| Accura ClearVue | -Biocompatível -Rígido ABS semelhante -Policarbonato semelhante | Fig 4 Tough-Gry 10 | Rígido ABS semelhante | VisiJet M2E-BK70 | Biocompatível |
| Accura AMX Rigid Black | -Biocompatível -Rígido (Policarbonato e uretano semelhante) | Fig 4 High Temp 150C FR Black | -Rígido (Policarbonato e uretano semelhante) | VisiJet M2S-HT250 | Biocompatível |
| Accura 25 | - Durável (polipropileno semelhante) | Fig 4 Rigid Gray | -Rígido (Policarbonato e uretano semelhante) | | |
| | | Fig 4 Rigid white | -Rígido (Policarbonato e uretano semelhante) Biocompatível | | |
| | | Fig 4 PRO-BLK 10 | -Rígido (Policarbonato e uretano semelhante) Biocompatível | | |
| | | Fig 4 MED-AMB 10 | Biocompatível | | |

Como já foi mencionado, durante este estudo, a biocompatibilidade é priorizada para que a ortótese possa ser usada sem a manga intermediária. No entanto, se com base nas propriedades mecânicas (estudadas no capítulo seguinte) de cada resina se justificar a escolha desse material em relação a um com capacidade biocompatível, o uso da manga é recomendado, o que poderá também trazer um aumento de conforto no uso da ortótese.

O processo de materialização da ortótese pode ser apresentado sucintamente no fluxo de trabalho apresentado na Figura 25.

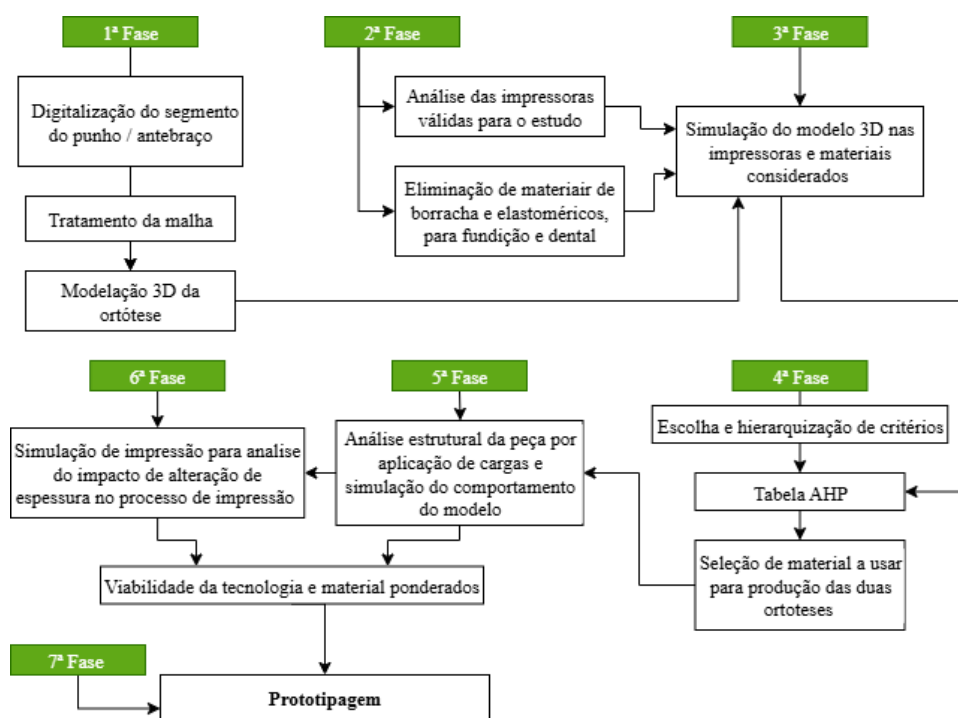


Figura 25 – Fluxo de trabalho preconizado para a prototipagem da ortótese

4. Procedimento experimental

O presente capítulo descreve os procedimentos experimentais adotados para a produção e avaliação das ortóteses de punho através de tecnologias de impressão 3D. O objetivo principal é detalhar as etapas que suportam a seleção das condições de fabrico, a análise comparativa dos materiais e a fundamentação das escolhas que conduzem às discussões de resultados e soluções finais.

Inicialmente é definida a orientação e posicionamento das peças na plataforma de impressão, o que na prática poderá afetar a qualidade superficial, resistência mecânica e eficiência do fabrico. A correta definição dos parâmetros afeta os tempos de produção e a quantidade de material necessária e por consequente o custo de produção.

De seguida, apresentam-se as simulações de impressão, realizadas com recurso a *software* e tabela de preços específicos da marca *3D Systems*. Estas simulações permitiram estimar o tempo de fabrico, o consumo de material e os custos associados, fornecendo dados para a análise comparativa. Para a realização das simulações, foi definida uma altura de camada específica para cada uma das três tecnologias analisadas. Essa altura de camada foi escolhida de forma a ser comum a todos os materiais pertencentes à mesma tecnologia, garantindo a consistência na comparação dos resultados. Além disso, optou-se por considerar sempre um valor intermédio dentro da gama de alturas de camada permitida por cada tecnologia, evitando tanto os limites mínimos (que privilegiam maior qualidade, mas aumentam o tempo de fabrico) como os máximos (que reduzem o tempo, mas comprometem a qualidade). Desta forma, assegurou-se uma análise equilibrada para todos os casos estudados.

Por último, é introduzida a aplicação do método Processo Analítico Hierárquico (AHP - *Analytic Hierarchy Process*), utilizado como ferramenta de apoio multicritério na seleção dos materiais. A análise divide-se em dois cenários distintos: um em que a biocompatibilidade é critério obrigatório, dada a possibilidade de contacto direto com a pele, e outro em que esse requisito não é imposto, ampliando o leque de alternativas possíveis.

4.1. Posicionamento do modelo na plataforma de impressão

Como foi mencionado anteriormente, foi dada prioridade à escolha de material, pelo que a área disponível de impressão ficou para segundo plano. No entanto, inicialmente pretendia-se que a comparação de custos tivesse como base as mesmas orientações em plataforma (possibilidades demonstradas na Figura 26) e o mesmo número de unidades por impressão.

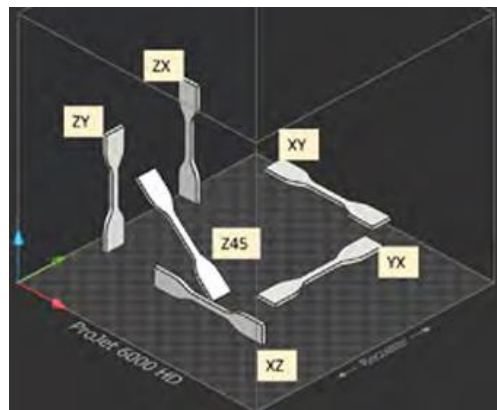


Figura 26 - possíveis orientações na plataforma de impressão

Com base na Figura 26, é importante mencionar que os materiais das três tecnologias mencionadas são reconhecidos como sendo isotrópicos, tendo propriedades mecânicas isotrópicas, ou seja, a impressão é uniforme em todas as direções não devendo existir diferença na escolha de orientação da peça na plataforma (X, Y, Z) mecânica e esteticamente.

Por esta razão, e uma vez que não é possível levar a cabo as simulações nas condições mencionadas, são simuladas em quantidades e orientações diferentes, como vamos poder observar no caso da tecnologia de SLA com as Figuras 27 a) e b) que se seguem.

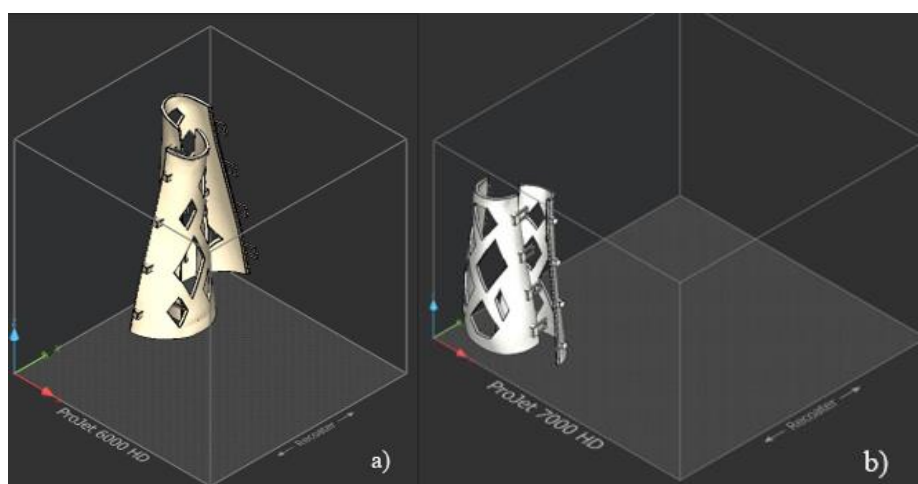


Figura 27 - Orientação da ortótese nas plataformas de impressão nas impressoras de SLA

Pode observar-se nas impressoras seleccionadas para a impressão na tecnologia de SLA, que ambas têm altura para que as duas partes da ortótese possam ser impressas em simultâneo e na vertical. A escolha da posição na vertical tem que ver com a quantidade de suportes necessários para a impressão do modelo e consequente consumo e desperdício de material. Neste caso, o facto de a ortótese ser impressa na vertical também significa que podem ser impressas mais quantidades em simultâneo, mesmo que isso se traduza num aumento de tempo de impressão, pode poupar-se o tempo de operação de máquina em retirar a impressão concluída e a preparação de uma nova impressão.

No caso da impressão em DLP e MJP, como vai ser observado nas Figuras 28 e 29 a) e b), a escolha de orientação é mais limitada devido à falta de área para orientar noutra direção.

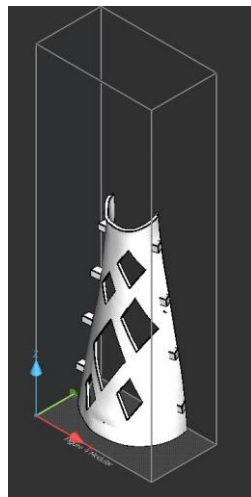


Figura 28 - Orientação possível de uma parte da ortótese na plataforma da impressora de DLP – *Figure 4 Modular*

Como visto, no caso da impressão na tecnologia de DLP, só é possível colocar uma parte da ortótese a imprimir de cada vez na vertical, não havendo alternativa de impressão noutra direção.

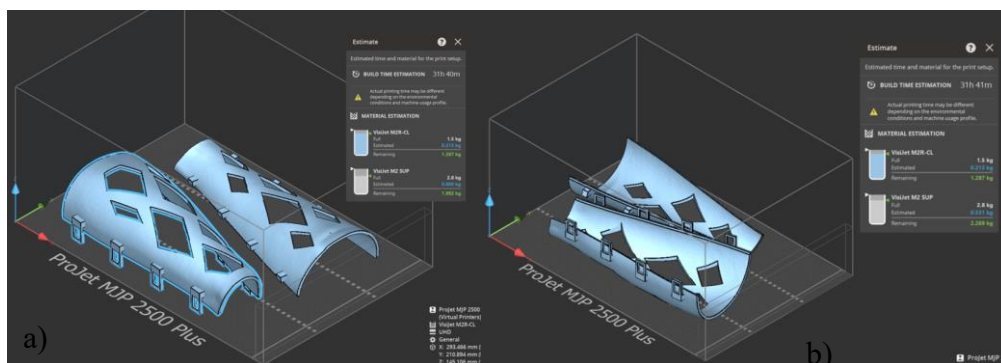


Figura 29 - Possíveis orientações do modelo da ortótese na plataforma da impressora de MJP

Pelas Figuras 29 a) e b), demonstra-se que a impressão na tecnologia de MJP é possível imprimir as duas partes da ortótese em simultâneo, contudo a impressora não tem altura suficiente para manter a posição vertical escolhida nas outras tecnologias, pelo que foi reposicionada. Pode também observar-se que a rotação da ortótese não altera a quantidade de material nem o tempo de impressão da mesma, pelo que a decisão terá apenas que ver com a zona a pós-processar caso necessário.

Mesmo sendo as três tecnologias consideradas isotrópicas, os valores das *datasheets* dos materiais selecionados para estudo têm por base a orientação escolhida para as respetivas simulações, tanto quanto possível. Para a tecnologia de SLA e DLP foram considerados os valores da orientação em ZX ou ZY, já para a de MJP foi valorizada a orientação em XY ou YX.

Para determinar qual o material a usar em cada tecnologia, são analisadas as *datasheets* de cada material pela comparação de várias propriedades mecânicas (Anexo I). Nas propriedades mecânicas, a norma ASTM D638 (Método de teste padrão para propriedades de tração) inclui a propriedade de *Tensile Strength Ultimate* (resistência à tração final) que é tensão máxima que o material consegue suportar antes de ceder ou quebrar, ou seja, quanto maior o valor, mais tensão suporta. O *Tensile Modulus* (módulo de Young), que determina a rigidez de um material e é definido como a razão entre a tensão de tração e a sua deformação, logo quanto menor for a deformação maior será o módulo de Young. Já a *Elongation at Break* (alongamento de rutura) refere a deformação plástica até quebrar, correspondendo à diferença da sua forma final com a inicial.

4.2. Simulações de impressão

Quanto à orçamentação de cada trabalho de impressão, cada estimativa é feita com base em valores associados aos equipamentos como impressora, acessórios de limpeza e pós-cura e materiais de impressão de cada tecnologia, bem como a margem que o fabricante contabilizar entre o preço de custo e o preço de venda.

O preço de custo de cada peça ou conjunto de peças é determinado por vários fatores como qual a impressora usada e correspondente valor de aquisição, valor de instalação, formação e garantia da mesma, sendo também dado um valor de custo por hora de utilização. É considerado o valor de alguns acessórios como a plataforma de impressão e equipamentos associados como câmara de cura bem como o tempo de uso da mesma na pós-cura. Tem

ainda em conta o número de peças por plataforma de impressão e o custo de resina usada para a construção da peça e suporte da mesma. Por último, analisa-se o tempo de processamento da peça por parte do utilizador, tendo início no *software* na orientação das peças e preparação da impressora e terminando no tratamento da mesma (limpeza, retirar suportes e lixa). Para isto, foi utilizada uma tabela de preços atualizada em 2023 disponível para *reseller* onde toda esta informação é preenchida.

Em relação ao tempo de produção, foi considerado tempo de importação e posicionamento do modelo na plataforma, colocação de suportes no *software*, exportação do ficheiro para a impressora, preparação da mesma e todo o pós-processamento necessário, como a remoção das peças da impressora e da plataforma de suporte de impressão, limpeza e remoção de suportes da peça e leve tratamento de superfície da mesma, tendo em conta que estes tempos podem variar entre impressoras.

Por uma questão de volume de impressão adequado para a produção do modelo de ortótese, consideraram-se duas impressoras de SLA, a *ProJet 6000HD* e a *ProJet 7000HD* para simular a quantidade de material e valor de custo de produção (Anexo II). Contudo, e por uma questão de disponibilidade do equipamento, os dados que servirão para comparação com as restantes impressoras será apenas a *ProJet 6000HD*, com os valores demonstrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Simulação de impressão e custos associados na impressora de SLA - *ProJet 6000HD*

| Resina | Valor da embalagem | Número de conjuntos | Suporte | Tempo de impressão | Quantidade estimada (cm ³) | VAT level (%) | Custo de produção |
|------------------------------|--------------------|---------------------|---------|--------------------|--|---------------|-------------------|
| Accura AMX High Temp 300C | ●● | 1 | Com | 25:32:00 | 457,5 | -2,7 | ●●●●●● |
| Accura AMX Tough FR V0 Black | ●●●●● | 1 | Com | 16:27:00 | 311,6 | -1,8 | ●●● |
| Accura Xtreme white 200 | ●●● | 1 | Com | 15:18:00 | 106,5 | -0,6 | ● |
| Accura Xtreme | ●●● | 1 | Com | 25:20:00 | 105,8 | -0,6 | ●● |
| Accura ABS Black | ●●● | 1 | Com | 15:09:00 | 103,7 | -0,6 | ● |
| Accura AMX Durable Natural | ● | 1 | Com | 43:06:00 | 127,7 | -0,7 | ●●●●●● |
| Accura ClearVue | ●●● | 1 | Com | 22:52:00 | 105,1 | -0,6 | ●● |
| Accura AMX Rigid Black | ●●● | 1 | Com | 17:28:00 | 122,1 | -0,7 | ● |
| Accura 25 | ●●● | 1 | Com | 15:24:00 | 105,8 | -0,6 | ● |

Uma vez que o volume de impressão é muito superior ao tamanho do modelo, as simulações são feitas para apenas um modelo e também para cinco modelos na mesma plataforma de

impressão (Anexo II). Os valores das embalagens de resina são iguais para as duas impressoras, tratando-se de quantidades iguais por embalagem.

De um modo geral (para todas as resinas simuladas) a impressora *ProJet 6000HD* tem a capacidade de imprimir o mesmo conjunto de forma mais rápida, devido ao trajeto do laser ser menor na *ProJet 6000HD* pelo seu volume de impressão ser mais pequeno em relação à *ProJet 7000HD*. Quanto à quantidade de material gasto, uma vez que se trata do mesmo ficheiro importado e as diferenças entre impressoras serem reduzidas, entende-se que a variação se deve a ligeiras desigualdades de posicionamento do modelo na plataforma, pois pode ser feita de forma manual pelo utilizador. Relativamente ao *Vat level* refere-se à percentagem de plataforma de impressão que é efetivamente ocupada pelos modelos importados, o que significa que quanto maior o volume de impressão, para o mesmo modelo, menor a percentagem ocupada com modelos iguais entre impressoras.

Por último, o valor de produção final dos modelos reflete o que foi mencionado. O facto de a impressora *ProJet 7000HD* ter um valor superior (tal como valores de garantia ou de acessórios associados a mesma), embora o valor das resinas e o seu tempo de cura ser o mesmo e o tempo de pós-processamento ter sido considerado o mesmo, combinado com o tempo de impressão ser ligeiramente superior faz com que consequentemente o valor de produção seja superior.

A produção de peças nesta tecnologia não é possível sem o uso de suportes estratégicos que possibilitam a construção da peça, no entanto, simulou-se a impressão sem a informação de suportes de forma a perceber o impacto no tempo e material. Para ambas impressoras, na mesma resina, a diferença de tempo deve-se às camadas que são formadas entre a plataforma de suporte da peça e a própria, pois obviamente a peça ao imprimir diretamente na plataforma, ao ser retirada iria ficar com as marcas da plataforma e com força exercida para a retirar, poderia partir. À semelhança do que acontece com a variação de tempos entre impressoras, o tempo entre resinas com suporte também acresce com base na deslocação do laser para solidificar a camada de suporte da peça.

Exatamente o mesmo acontece quando são comparadas as simulações de cinco modelos por plataforma. Neste cenário, é necessário reforçar que o tempo de pós-processamento seria cinco vezes o tempo de tratamento de apenas um modelo, pois o único tempo poupado seria no preparar a impressora para uma nova impressão e remoção das peças da impressora.

Na impressora de DLP, como foi possível ver anteriormente, é necessário produzir o modelo por duas impressões distintas por só ser possível colocar uma parte de cada vez no volume útil da impressora. Para elaborar este estudo (retratado na Tabela 10), as simulações foram feitas individualmente e depois somados os consumos de tempo e material.

Tabela 10 - Simulação de impressão e custos associados na impressora de DLP - *Figure 4 Modular*

| Resina | Valor da embalagem | Parte impressa | Suporte | Tempo de impressão | Quantidade de material (g) | Custo de produção |
|-------------------------------|--------------------|----------------|---------|--------------------|----------------------------|-------------------|
| Fig 4 Tough Clear | ●●●●● | Parte 1 e 2 | Com | 22:30:00 | 210,3 | ●●●●● |
| Fig 4 Tough 60C White | ●●●●● | Parte 1 e 2 | Com | 18:03:00 | 221,6 | ●●●●● |
| Fig 4 Tough 65C Black | ●●●●● | Parte 1 e 2 | Com | 14:31:00 | 267,0 | ●●●●● |
| Fig 4 Tough FR V0 Black | ● | Parte 1 e 2 | Com | 08:41:00 | 186,9 | ● |
| Fig 4 Tough-BLK 20 | ●●● | Parte 1 e 2 | Com | 10:01:00 | 168,3 | ●● |
| Fig 4 Tough-Gry 15 | ●● | Parte 1 e 2 | Com | 08:26:00 | 182,6 | ● |
| Fig 4 Tough-Gry 10 | ●●● | Parte 1 e 2 | Com | 05:23:00 | 182,6 | ● |
| Fig 4 High Temp 150C FR Black | ●●●●● | Parte 1 e 2 | Com | 14:42:00 | 263,9 | ●●●●● |
| Fig 4 Rigid Gray | ●●●● | Parte 1 e 2 | Com | 08:52:00 | 256,9 | ●● |
| Fig 4 Rigid white | ●●●● | Parte 1 e 2 | Com | 09:30:00 | 241,9 | ●● |
| Fig 4 PRO-BLK 10 | ●●●● | Parte 1 e 2 | Com | 06:57:00 | 171,3 | ● |
| Fig 4 MED-AMB 10 | ●●●● | Parte 1 e 2 | Com | 11:57:00 | 221,3 | ●●● |

Uma vez que o modelo é feito por duas impressões, este processo de troca e início de nova impressão é considerado tempo de operador no tratamento da impressora. Embora tenha este processo de troca, esta impressora é capaz de impressões muito rápidas e tem períodos de cura de no máximo 90 minutos, o que no geral se mantém mais rápido do que algumas outras tecnologias de impressão.

Uma vez que a quantidade de material consumido e o tempo de cura é semelhante de resina para resina, o fator de custo de produção determinante é o preço da embalagem de resina e o tempo de impressão.

À semelhança do que foi estudado para a tecnologia de SLA, quis-se saber qual o impacto da criação de suportes no tempo e no material consumido em DLP. Na mesma resina, a diferença de tempo deve-se apenas às camadas que são formadas entre a plataforma de suporte da peça e a própria peça, para não deformar a mesma nem a quebrar na altura de remoção, pois a fonte de luz solidifica a camada por inteiro, não dependendo do tempo de varrimento do laser.

Por fim, são apresentados os resultados das simulações de impressão para a impressora de MJP, *ProJet 2500Plus* na Tabela 11.

Tabela 11 - Simulação de impressão e custos associados na impressora de MJP - ProJet 2500 Plus

| Resina | Valor da embalagem (1,5Kg) | Número de conjunto | Tempo de impressão | Quantidade de material estimada (Kg) | Quantidade de material restante (Kg) | Quantidade de material de suporte estimado (Kg) | Quantidade de material de suporte restante (Kg) | Custo de produção |
|----------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|---|-------------------|
| VisiJet Armor Max (M2G-JF) | ●●●●● | 1 | 31:46:00 | 0,2 | 1,3 | 0,8 | 2,0 | ●●●●● |
| VisiJet ProFlex (M2G-DUR) | ●● | 1 | 31:48:00 | 0,2 | 1,3 | 0,5 | 2,3 | ● |
| VisiJet M2R-TN | ●● | 1 | 31:41:00 | 0,2 | 1,3 | 0,5 | 2,3 | ● |
| VisiJet M2R-GRY | ● | 1 | 31:41:00 | 0,2 | 1,3 | 0,5 | 2,3 | ● |
| VisiJet Armor (M2G-CL) | ● | 1 | 31:55:00 | 0,2 | 1,3 | 0,5 | 2,3 | ● |
| VisiJet M2R-CL | ●● | 1 | 31:41:00 | 0,2 | 1,3 | 0,5 | 2,3 | ● |
| VisiJet M2E-BK70 | ●●●●● | 1 | 31:48:00 | 0,2 | 1,3 | 0,8 | 2,0 | ●●●●● |
| VisiJet M2S-HT250 | ●●●●● | 1 | 33:07:00 | 0,2 | 1,3 | 0,6 | 2,2 | ●●● |
| VisiJet M2 SUP (2,8Kg) | ● | | | | | | | |

Como se observou na Figura 29 da orientação das partes do modelo na plataforma, as três bandas de impressão foram ocupadas, o que significa que para todas as resinas simuladas, o tempo de construção para cada será igual pois o consumo de material, exposição da luz UV e passagem do *planarizer* é semelhante em todas.

Também na Figura 29 foi possível ver que a escolha de orientação não mostra grande variação de material de construção e suporte consumidos nem do tempo de produção dos modelos. Foi escolhida a orientação b) com base a facilidade de pós-tratamento da peça caso necessário. Em alguns casos, podem ficar resíduos de suportes que se não forem tratados e permanecerem na parte interior do modelo e forem assim entregues (acidentalmente) ao paciente, podem causar algum desconforto.

Tratando-se de uma peça relativamente fina (2,5mm de espessura) e com formato curvo, é normal que o consumo de suportes seja bastante superior ao consumo de material de

construção, uma vez que não são analisados os pontos de suporte necessários, mas sim a forma de dar suporte à camada inteira, o que por um lado permite que não haja problemas de empenos por falta de suportes como pode acontecer noutras tecnologias.

4.3. Tabela AHP – hierarquização de critérios

Como foi mencionado, através do método AHP, analisam-se dois cenários distintos, um em que a biocompatibilidade é critério obrigatório, dada a possibilidade de contacto direto com a pele, e outro em que esse requisito não é imposto por ser utilizada uma manga intermédia.

Na ortótese de contacto direto, priorizam-se aspetos como a biocompatibilidade, e flexibilidade adequada, para o segundo cenário os aspetos destacados são a rigidez estrutural pela combinação da resistência mecânica com a aplicação da manga e o custo e tempo de produção da mesma para uma solução mais rápida e económica.

A seleção de materiais constitui uma etapa crítica no desenvolvimento deste tipo de modelos a produzir, especialmente em áreas médicas onde é permitida a personalização como as ortóteses de punho. A diversidade de materiais atualmente disponíveis para tecnologias de impressão 3D exige uma avaliação sistemática que permita considerar as propriedades mecânicas e funcionais dos materiais, mas também requisitos específicos como a biocompatibilidade, o tempo de produção e os custos associados. Neste contexto, a aplicação de métodos multicritério surge como uma ótima ferramenta de apoio à decisão.

Pelo método AHP, que permite estruturar problemas complexos de decisão, hierarquizando critérios, atribui-se pesos relativos e compara-se alternativas de forma consistente e quantitativa. O AHP torna-se útil na seleção de materiais, pois possibilita incorporar simultaneamente dados quantitativos (por exemplo, valores de resistência à tração ou alongamento à rutura) e fatores qualitativos (como biocompatibilidade) num mesmo processo decisório.

Para este estudo foram considerados cinco critérios de seleção:

- A) Resistência mecânica (avaliada através dos valores de *tensile strength*, critério essencial para garantir a integridade estrutural da ortótese durante o uso);
- B) Flexibilidade (expressa pelo *elongation at break*, importante para assegurar conforto e acomodação aos movimentos naturais do paciente enquanto situação de escritório);

- C) Biocompatibilidade (critério obrigatório quando existe contacto direto com a pele, assegurando a segurança do paciente);
- D) Tempo de produção (que reflete a viabilidade prática e rapidez de resposta);
- E) Preço de custo de produção (relevante para a sustentabilidade económica da solução).

A hierarquização dos critérios foi feita através da atribuição de valores:

- 1) Pouco importante;
- 2) Média/igual importância;
- 3) Muito importante;

Com base nestes critérios, foram analisados diferentes materiais de impressão 3D referidos anteriormente. O processo de comparação permitiu hierarquizar a importância relativa de cada critério, sendo a resistência mecânica e a biocompatibilidade considerados fatores prioritários, demonstrados nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 - Processo de hierarquização de critérios AHP para modelo 3D de contacto direto

| Resistência mecânica | Flexibilidade | Biocomp. | Tempo de produção | Preço de custo de produção | | | | Soma | Ponderação |
|----------------------|---------------|----------|-------------------|----------------------------|---|----------------------------|-------|------|------------|
| A | B | C | D | E | | | | | |
| | A2 | C3 | D1 | A3 | A | Resistência mecânica | | 5 | 19,2 |
| | | C3 | B3 | B3 | B | Flexibilidade | | 6 | 23,1 |
| | | | C3 | C3 | C | Biocompatibilidade | | 12 | 46,2 |
| | | | | E2 | D | Tempo de produção | | 1 | 3,8 |
| | | | | | E | Preço de custo de produção | | 2 | 7,7 |
| | | | | | | | total | 26 | 100 |

Tabela 13 - Processo de hierarquização de critérios AHP para modelo 3D de contacto indireto

| Resistência mecânica | Flexibilidade | Biocomp. | Tempo de produção | Preço de custo de produção | | | | Soma | Ponderação |
|----------------------|---------------|----------|-------------------|----------------------------|---|----------------------------|-------|------|------------|
| A | B | C | D | E | | | | | |
| | B2 | A3 | D2 | E2 | A | Resistência mecânica | | 3 | 13,6 |
| | | C1 | D2 | E2 | B | Flexibilidade | | 2 | 9,01 |
| | | | D3 | E3 | C | Biocompatibilidade | | 1 | 4,5 |
| | | | | E2 | D | Tempo de produção | | 7 | 31,8 |
| | | | | | E | Preço de custo de produção | | 9 | 40,9 |
| | | | | | | | total | 22 | 100 |

Após avaliação dos critérios, procedeu-se a atribuição da aptidão dos materiais e processos. Para garantir uma análise equilibrada, a aptidão de cada processo em relação às diferentes

características e propriedades foi ponderada de acordo com as respectivas capacidades. Para este efeito, foi definida uma escala qualitativa de desempenho:

- 0) O processo não possui desempenho relevante;
- 1) O processo possui um fraco desempenho;
- 3) O processo possui um desempenho médio;
- 9) O processo possui um excelente desempenho;

A aplicação do AHP resultou na seleção de dois materiais: um que cumpre obrigatoriamente os requisitos de biocompatibilidade, e outro que, embora não biocompatível, apresenta propriedades mecânicas e económicas relevantes para efeitos de comparação experimental.

Deste modo, a análise AHP fornece uma base objetiva para a decisão, permitindo não apenas justificar a escolha final dos materiais, mas também abrir caminho para a discussão crítica dos resultados.

4.4. Simulação numérica

Com o objetivo de avaliar o desempenho estrutural da ortótese, foram simulados vários modelos da ortótese em três espessuras distintas (1,75 mm, 2,5 mm e 3,25 mm) para as resinas selecionadas onde são aplicadas forças de 20, 50, 100N.

A seleção das espessuras de 1,75 e 3,25mm teve como objetivo estudar o comportamento estrutural da ortótese em diferentes cenários de rigidez e massa, permitindo identificar a solução mais equilibrada entre segurança, conforto e viabilidade do fabrico. A espessura de 1,75mm foi escolhida para representar uma condição estrutural mais crítica para avaliar o desempenho com mínimo consumo de material e menor peso associado e simular um limite inferior e analisar a margem de segurança numa espessura intencionalmente reduzida. A espessura de 3,25mm foi escolhida como opção mais robusta para avaliar o comportamento mecânico quando é necessária uma maior rigidez e suporte (quando são analisadas cargas superiores) e para verificar se o aumento da espessura influencia os valores obtidos face à aplicação das forças.

As forças aplicadas foram escolhidas para simular diferentes cenários durante a utilização da ortótese. Considerando que a paciente tem 80Kg e que o antebraço corresponde a aproximadamente 2% do peso corporal, os 20N aplicados corresponde ao peso real do

segmento corporal (antebraço e mão) quando o membro está em repouso. Os 50N corresponde a situações como o apoiar o antebraço na mesa com mais firmeza ou usar o segmento para estabilizar o corpo ao sentar ou levantar ou simular pequenos possíveis impactos. Já os 100N funcionam como simulação de situações acidentais como um maior impacto ou movimento brusco, garantindo margens de segurança e permitindo avaliar o comportamento estrutural da ortótese em condições extremas.

Considerando que os conectores funcionam na perfeição, não permitindo movimentação nem abertura entre as partes da ortótese, foram vistos como condições de fronteiras os limites entre as mesmas quando aplicadas as diferentes forças, como representada a Figura 30.

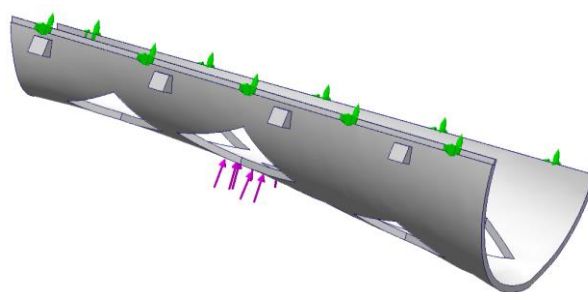


Figura 30 - Zona de aplicação das forças 20, 50, 100N

Para cada teste feito, é apresentado um diagrama de cores com valores máximos e mínimos correspondentes, para representar visualmente a distribuição dos esforços mecânicos na peça quando é sujeita à carga aplicada. A cor vermelha é a região com maior concentração de tensão ou deslocamento (maior deformação visível) e a azul a região que permanece mais estável, como sugere a Figura 31.

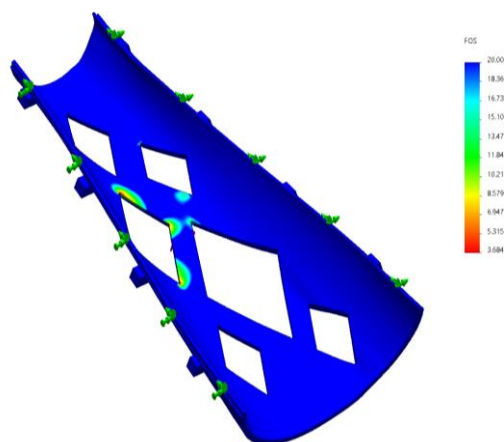


Figura 31 - Representação do diagrama de cores e valores respetivos obtidos conforme aplicação de cargas

Assim sendo, no *Solidworks simulation* são analisados:

- *Stress* (tensão): mede a distribuição das tensões internas no material quando a peça é submetida a cargas. Indica onde há maior risco de falha por excesso de esforço mecânico. O valor máximo obtido deve ser comparado ao valor de *yield strength* que se for ultrapassado significa que a espessura não é adequada e que a peça poderá apresentar falha mecânica. As maiores espessuras tendem a ter este valor menor, aumentando a margem de segurança.
- *Displacement* (Resultant *Displacement*): Calcula o deslocamento total resultante da peça após aplicação das cargas. Mostra o quanto a geometria se deforma no espaço, combinando todas as direções. Quanto maior for este valor, mais comprometida estará a função da ortótese. Mais uma vez, uma maior espessura tende a apresentar deslocamentos menores.
- *Strain* (Equivalent *Strain*): Avalia a deformação relativa do material em função das tensões aplicadas. Representa quanto o material estica ou comprime, sem considerar a recuperação elástica sendo que os valores elevados próximos a zonas críticas sugerem risco de perda de geometria da ortótese.
- *Factor of safety* (Fator de Segurança): Relação entre a tensão de cedência do material e a tensão máxima aplicada (valor de *stress* obtido na simulação) (equação 1). Valores >1 significam que a peça resiste às cargas; valores próximos de 1 ou <1 indicam risco de falha. Espessuras maiores terão valores de segurança maiores, conferindo confiabilidade no uso.

$$\text{Fator de Segurança} = \frac{\text{Tensão de cedência do material}}{\text{Tensão máxima aplicada}} \quad (1)$$

Esta página foi deixada intencionalmente em branco

5. Análise e Discussão de resultados

Como foi referido em capítulos anteriores, na tecnologia de SLA só foi considerada a impressora *ProJet 6000HD* devido à disponibilidade das impressoras, na tecnologia de DLP só foram analisados os dados retirados da impressora *Figure 4 Modular* pois a *Figure 4 Standalone* não tinha volume suficiente para imprimir as peças do modelo.

Relativamente ao tempo de impressão, foi contemplado o posicionamento do modelo e parametrização no *software*, preparação da impressora e das resinas, cura e pós-processamento dos modelos, que variam entre impressoras.

Já na orçamentação dos trabalhos de impressão, foram examinados os valores associados aos equipamentos como impressora, garantia, acessórios de limpeza, pós-cura e materiais de impressão de cada tecnologia. Tem em conta o número de peças por plataforma de impressão e o custo de resina usada para a construção da peça e suporte da mesma. Por último, foi consultada uma tabela de preços disponível para *reseller* onde toda a informação é preenchida.

Comparando finalmente os resultados obtidos pelas simulações de impressão e custos associados entre as 3 impressoras na impressão de apenas um modelo, podem ser discutidos vários aspetos.

No que diz respeito ao tempo de impressão, a tecnologia mais demorada é a de MJP, seguida da SLA e por fim a de DLP, mesmo contabilizando a necessidade de impressão do modelo por duas plataformas de impressão. O tempo de impressão de DLP poderia ainda ser mais reduzido se houvesse a capacidade de aquisição de duas impressoras *Figure 4 Modular*, que poderiam imprimir em simultâneo. Como já foi visto, DLP é mais rápido do que SLA por ser solidificada a camada inteira da peça a imprimir e não depender do tempo de varrimento do laser como em SLA. Também neste caso, o DLP torna-se mais rápido que MJP por nesta serem ocupadas as 3 bandas de impressão e por ter um tempo de exposição maior à luz UV, facto que contribui para o não ser necessário tempo de pós cura para esta tecnologia.

Relativamente ao pós-processamento, MJP é a tecnologia que poupa mais tempo de operador por não ser necessária uma pós-cura nem remoção de suporte de forma manual. A tecnologia de DLP é ligeiramente mais demorada do que SLA por ser necessário fazer a substituição da plataforma de impressão para colocar o modelo seguinte a imprimir, mais uma vez um aspeto

que seria resolvido com a aquisição de uma segunda impressora. No pós-tratamento em si, as resinas de SLA demoram o dobro do tempo na câmara de cura do que as de DLP, mas o trabalho de superfície é exatamente o mesmo.

Em termos de custos, e como já tinha sido mencionado, a impressora de SLA é a que tem um valor mais alto, seguida da de MJP e por fim a de DLP. Como tal, todos os valores associados têm a mesma ordem de valores, sendo que o mesmo se aplica aos consumíveis das mesmas consoante a quantidade que cada embalagem tem.

Uma vez que a impressão de cinco unidades de cada vez não seria facilmente comparável com as restantes impressoras, apenas se pode considerar o valor de produção unitária retirado deste cenário continuaria a ser superior à impressão unitária pela tecnologia de DLP.

A seleção dos critérios de hierarquização baseou-se nos requisitos práticos essenciais para a produção de ortóteses de punho personalizadas. A resistência mecânica e a flexibilidade foram considerados prioritários, garantindo segurança estrutural e conforto. A biocompatibilidade foi incluída como fator determinante sempre que existe contacto direto com a pele. Já os critérios de tempo e custo de produção asseguram a viabilidade prática e económica da solução.

A aplicação do método AHP permitiu hierarquizar os diferentes materiais considerados, resultando na atribuição de uma pontuação global para cada alternativa em função dos critérios previamente definidos. A análise dos resultados evidencia que o material com maior pontuação apresenta uma combinação mais equilibrada de propriedades mecânicas, flexibilidade, biocompatibilidade, tempo e custo de produção, o que o torna a escolha mais adequada para cada cenário definido, como mostrado nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 - Aptidão dos materiais face aos critérios definidos para o modelo 3D de contacto direto

| Tecn | Material | Biocomp | Resistencia mecânica (<i>tensile strength</i>) | Flexibilidade adequada (<i>elongation at break</i>) | Biocomp. | Tempo de produção | Custo de produção | Total |
|------|------------------------|---------|--|---|----------|-------------------|-------------------|-------|
| | | | 19,3 | 23,1 | | | | |
| SLA | Accura ClearVue | sim | 1 | 0 | 9 | 1 | 9 | 507,7 |
| SLA | AccuravAMX Rigid Black | sim | 1 | 3 | 9 | 3 | 9 | 584,6 |
| DLP | Tough 60C White | sim | 1 | 3 | 9 | 3 | 0 | 515,4 |
| DLP | Rigid Whitw | Sim | 9 | 3 | 9 | 9 | 1 | 700 |
| DLP | PRO-BLK 10 | Sim | 9 | 1 | 9 | 9 | 3 | 669,2 |
| DLP | MED-AMB 10 | Sim | 9 | 0 | 9 | 9 | 1 | 630,8 |

Comparação da produção de uma ortótese através de processos de Estereolitografia (SLA), Processamento de Luz Digital (DLP) e *MultiJet Printing* (MJP)

| | | | | | | | | |
|-----|-------------------|-----|---|---|---|---|---|-------|
| MJP | VisiJet M2R-TN | Sim | 9 | 0 | 9 | 0 | 9 | 657,7 |
| MJP | VisiJet M2R-GRY | Sim | 3 | 1 | 9 | 0 | 9 | 565,4 |
| MJP | VisiJet M2R-CL | Sim | 3 | 1 | 9 | 0 | 9 | 565,4 |
| MJP | VisiJet M2E-BK70 | Sim | 0 | 9 | 9 | 0 | 9 | 692,3 |
| MJP | VisiJet M2S-HT250 | Sim | 9 | 0 | 9 | 0 | 9 | 657,7 |

Tabela 15 - Aptidão dos materiais face aos critérios definidos para o modelo 3D de contacto indireto

| Tecn | Material | Biocomp | Resistência mecânica (<i>tensile strength</i>) | Flexibilidade adequada (<i>elongation at break</i>) | Biocomp. | Tempo de produção | Custo de produção | Total |
|------|------------------------------|---------|--|---|----------|-------------------|-------------------|-------|
| | | | 13,6 | 9,1 | | | | |
| SLA | Accura AMX High temp 300 | | 9 | 0 | 0 | 1 | 3 | 277,3 |
| SLA | Accura AMX Tough FR V0 Black | | 1 | 1 | 0 | 3 | 9 | 486,4 |
| SLA | Accura Xtreme White 200 | | 3 | 0 | 0 | 3 | 9 | 504,5 |
| SLA | Accura Xtreme | | 3 | 1 | 0 | 1 | 9 | 450 |
| SLA | Accura ABS black | | 3 | 0 | 0 | 3 | 9 | 504,5 |
| SLA | Accura AMX Durable Natural | | 1 | 9 | 0 | 0 | 3 | 218,2 |
| SLA | Accura ClearVue | Sim | 3 | 0 | 9 | 3 | 9 | 545,5 |
| SLA | AccuravAMX Rigid Black | Sim | 3 | 1 | 9 | 3 | 9 | 554,5 |
| SLA | Accura 25 | | 3 | 1 | 0 | 3 | 9 | 513,6 |
| DLP | Tough Clear | | 3 | 0 | 0 | 3 | 0 | 136,4 |
| DLP | Tough 60C White | Sim | 1 | 1 | 9 | 3 | 0 | 159,1 |
| DLP | Tough 65C black | | 3 | 1 | 0 | 9 | 1 | 377,3 |
| DLP | Tough FR V0 Black | | 3 | 3 | 0 | 9 | 3 | 477,3 |
| DLP | Tough BLK 20 | | 3 | 1 | 0 | 9 | 3 | 459,1 |
| DLP | Tough Gry 15 | | 3 | 1 | 0 | 9 | 3 | 459,1 |
| DLP | Tough Gry 10 | | 3 | 1 | 0 | 9 | 3 | 459,1 |
| DLP | High Temp 150C FR Black | | 9 | 0 | 0 | 9 | 0 | 409,1 |
| DLP | Rigid Gry | | 9 | 1 | 0 | 9 | 1 | 459,1 |
| DLP | Rigid Whitw | Sim | 9 | 1 | 9 | 9 | 1 | 500 |
| DLP | PRO-BLK 10 | Sim | 9 | 0 | 9 | 9 | 3 | 572,7 |
| DLP | MED-AMB 10 | Sim | 9 | 0 | 9 | 9 | 1 | 490,9 |
| MJP | VisiJet Armor Max (M2G-JF) | | 1 | 1 | 0 | 1 | 9 | 422,7 |
| MJP | VisiJet ProFlex (M2G-DUR) | | 1 | 9 | 0 | 1 | 9 | 495,5 |
| MJP | VisiJet M2R-TN | Sim | 9 | 0 | 9 | 1 | 9 | 563,6 |
| MJP | VisiJet M2R-GRY | Sim | 3 | 0 | 9 | 1 | 9 | 481,8 |
| MJP | VisiJet Armor (M2G-CL) | | 1 | 9 | 0 | 1 | 9 | 495,5 |
| MJP | VisiJet M2R-CL | Sim | 3 | 0 | 9 | 1 | 9 | 481,8 |
| MJP | VisiJet M2E-BK70 | Sim | 0 | 1 | 9 | 1 | 9 | 450 |
| MJP | VisiJet M2S-HT250 | Sim | 3 | 0 | 9 | 1 | 9 | 481,8 |

No caso da produção de uma ortótese com obrigatoriedade biocompatível, o material com maior pontuação foi o Figure 4 Rigid White. Já para o cenário sem obrigatoriedade biocompatível e com preferência no fator resistência (embora também seja um material

biocompatível), a resina com maior pontuação é o PRO-BLK 10. Ambas as resinas (Anexo III e IV) são usadas na impressora *Figure 4 Modular*, o que reflete a validação capacidade e de resposta por parte da tecnologia DLP.

No entanto, importa destacar que o valor obtido para o material com melhor desempenho não se encontra totalmente dissociado das pontuações atribuídas às alternativas seguintes. Em ambos os cenários, verifica-se que o segundo material mais bem classificado, na tecnologia MJP apresenta uma pontuação relativamente próximo, o que levanta a questão de se seria mais adequado considerar ambos como potenciais candidatos à prototipagem.

Para o estudo realizado para a produção de uma ortótese para aplicação direta no segmento corporal, o material Rigid white de DLP comparativamente ao VisiJet M2E-BK70 de MJP tem melhor resistência mecânica (por comparação do valor de *Tensile Strength*) e privilegiou do peso do critério de tempo de produção, pelo que obteve melhor pontuação nestes aspetos. O material de MJP poderia ter melhor pontuação se fosse privilegiada a flexibilidade (cuja percentagem de *elongation* é superior).

Já para o caso em que será necessária uma manga intermédia para uso indireto no segmento corporal, a resina PRO-BLK 10 de impressão em DLP, em comparação com o material VisiJet M2R-TN da tecnologia MJP tem a vantagem de ter um tempo e custo de produção mais reduzido. No caso do material Accura AMX Rigid Blk de SLA tinha melhores propriedades de *elongation at break* mas o peso dado ao critério de tempo de produção acabou por ser determinante.

Em contraste, os materiais que obtiveram as piores pontuações demonstraram limitações claras face aos critérios definidos. Alguns apresentaram valores reduzidos de resistência ou *elongation at break*, comprometendo a estabilidade estrutural da ortótese. Outros, mostraram tempos de fabrico e de pós-processamento mais elevados ou custos significativamente superiores, o que reduziu a sua viabilidade para a aplicação prática. Assim, embora estes materiais possam ter aplicações nesta ou noutras áreas, revelaram-se pouco adequados para a produção de ortóteses de punho no contexto estudado.

Em suma, noutro contexto, enquanto o material melhor classificado pode destacar-se pela maior resistência mecânica e rigidez estrutural, o segundo classificado pode apresentar melhor desempenho em termos de flexibilidade ou menor tempo de produção, o que também

constitui uma vantagem significativa em exemplos semelhantes. A decisão final entre os dois dependerá, portanto, de prioridades específicas: maior durabilidade e robustez por um lado, ou maior conforto e eficiência de fabrico por outro, ou de outros fatores contextuais não incluídos no modelo — como disponibilidade imediata de material, experiência de utilização de determinada tecnologia ou impressora ou preferências de *design* que altere o tempo construção ou material consumido.

Contudo, para efeitos do presente trabalho, assume-se que a seleção final deve recair sobre apenas um material por cenário, de forma a estabelecer um critério de decisão claro e objetivo. Assim, a escolha recaiu na resina Figure 4 Rigid white para a produção de ortótese biocompatível e Figure 4 PRO-BLK 10 para produção de ortótese com maior resistência pois terminaram o estudo com maior pontuação.

Na procura de um material para a produção de uma ortótese de contacto indireto em que a obrigatoriedade de biocompatibilidade não estava presente, optou-se ainda assim por incluir este critério na análise AHP. Ao manter este parâmetro, ainda que com menor peso relativo, alargou-se a abrangência da análise, permitindo avaliar propriedades complementares que, em determinados contextos, podem revelar-se importantes, como observado pelo presente estudo, que assegura que são analisadas todas as hipóteses para encontrar um material que apresente excelente resistência mecânica e/ou estabilidade dimensional e que pode ser adequado em situações de prototipagem rápida ou de fabrico de ortóteses.

Depois de selecionado o material mais adequado para a construção em ambos os cenários (Rigid White para aplicação direta e PRO-BLK 10 para aplicação indireta), procedeu-se a um estudo de aplicação de Forças no *software SolidWorks* (Apêndice A), considerando a espessura original de 2,5mm. O objetivo desta análise foi verificar se, perante a aplicação das mesmas cargas (20, 50, e 100N), a diferença de material influenciava os resultados obtidos em termos de deformação (*Strain*), deslocamento (*displacement*) e tensão (*stress*), que estão presentes na Tabela 16.

Tabela 16 - Dados retirados das simulações de aplicação de cargas nas várias espessuras definidas

| Material | Necessidade biocompatível | Espessura (mm) | Carga (N) | Stress Max (tensão) (Mpa) | Displacement Max (Resultant Displacement) (URES mm) | Strain Max (Equivalent Strain) | Factor of Safety |
|-------------|---------------------------|----------------|-----------|---------------------------|---|--------------------------------|------------------|
| Rigid white | Sim | 2,5 | 20 | 6,8 | 0,1 | 0,003 | 8,3 |
| | | | 50 | 17,1 | 0,3 | 0,007 | 3,3 |
| | | | 100 | 34,2 | 0,6 | 0,013 | 1,7 |
| | | 1,75 | 20 | 10,3 | 0,2 | 0,004 | 5,5 |
| | | | 50 | 25,7 | 0,6 | 0,009 | 2,2 |
| | | | 100 | 51,5 | 1,2 | 0,018 | 1,1 |
| | | 3,25 | 20 | 4,5 | 0,1 | 0,002 | 12,6 |
| | | | 50 | 11,3 | 0,2 | 0,004 | 5,0 |
| | | | 100 | 22,6 | 0,3 | 0,009 | 2,5 |
| PRO-BLK 10 | Não | 2,5 | 20 | 6,8 | 0,1 | 0,002 | 9,2 |
| | | | 50 | 17,1 | 0,3 | 0,006 | 3,7 |
| | | | 100 | 34,2 | 0,5 | 0,012 | 1,8 |
| | | 1,75 | 20 | 10,3 | 0,2 | 0,003 | 6,1 |
| | | | 50 | 25,7 | 0,5 | 0,008 | 2,5 |
| | | | 100 | 51,5 | 1,1 | 0,016 | 1,2 |
| | | 3,25 | 20 | 4,5 | 0,1 | 0,002 | 13,9 |
| | | | 50 | 11,3 | 0,1 | 0,004 | 5,6 |
| | | | 100 | 22,6 | 0,3 | 0,008 | 2,8 |

De forma geral, para todos os testes feitos, para cada espessura e material analisado, quando a carga aumenta, os valores de tensão, deslocamento e *Strain* também aumentam de forma proporcional, sendo consistente com o comportamento normal esperado nas condições do ensaio feito. Já o valor de fator de segurança diminui com o aumento da carga, mostrando maior probabilidade de falha

Para ambos os materiais, calculando a média entre Força aplicada, a espessura de 1.75mm é a que apresenta maiores valores de *stress*, deslocamento e *Strain* e o menor valor de fator de segurança. Usando o exemplo de aplicação de 100N, a tensão atinge valores de 51N, valor que se encontra muito próximo do limite de cedência do material, enquanto o fator de segurança tem valor perto de 1, o que significa que a margem é muito reduzida e próxima do limite, havendo risco de deformação permanente. Isto leva a querer que a espessura de 1.75mm não é aconselhada para aplicações com cargas elevadas, sendo ideal para aplicações estéticas.

Já na espessura de 2.5mm, em média, há uma redução do valor do *stress* e do deslocamento e o fator de segurança já aumenta para ambos os materiais, o que significa que oferece uma margem mais confortável do que a espessura de 1.75mm.

Por último, na espessura de 3.5mm, obtém-se os menores valores de *stress* e de deslocamento e valores de fator de segurança maiores que as restantes espessuras. Sendo que o valor de tensão máxima obtido pelo teste está claramente abaixo do limite de cedência do material, sugere que esta será a espessura mais segura das três do ponto de vista estrutural e que a ortótese com esta espessura deverá suportar cargas mais elevadas.

Entre os materiais PRO-BLK 10 e Rigid White, os valores de tensão, deslocamento e *Strain* são muito semelhantes, indicando que as propriedades dos materiais são idênticas entre si (constatado pelos valores da *datasheet*) e que as condições dos testes foram efetivamente iguais.

A maior diferença detetada para os mesmos testes nas mesmas espessuras entre os materiais é o valor de fator de segurança (por exemplo com a aplicação de 100N na espessura de 3.25mm, PRO-BLK 10 tem valor de 2,8 e Rigid white tem 2,5). Isto acontece por o PRO-BLK 10 ter um valor superior de *tensile strength* em relação ao Rigid White (PRO-BLK 10 tem 63Mpa e Rigid White tem 57Mpa).

Na prática, se colocarmos os dois materiais com o mesmo objetivo de aplicação, considerando apenas a resistência mecânica como critério relevante, o PRO-BLK 10 oferece melhor valores de tensão, deslocamento e *Strain*, apresentando vantagem no valor do fator de segurança para a mesma geometria.

Analisando individualmente cada teste feito com o exemplo do material PRO-BLK 10, o *stress* máximo com aplicação de 100N reflete 22,6MPa na espessura 3.25mm e 51,5MPa na espessura de 1.75mm, o que significa que a primeira espessura deforma menos e que a segunda ao ter um valor tão elevado, poderá deformar permanentemente. O deslocamento, para a aplicação de 100N oferece valor de 0,3mm para PRO-BLK 10 com 3.25mm de espessura e 0,3mm para Rigid White para a mesma espessura. Uma vez que o objetivo é conter a carga aplicada, quanto menor a espessura, maior o deslocamento e menor a eficácia necessária para o propósito. Para o *Strain*, para os mesmos exemplos dados anteriormente, os valores são muito idênticos para ambos materiais, contudo obtendo um valor maior na espessura 1.75mm, significa que maior é a probabilidade de haver rotura e perda de

geometria neste cenário. O critério decisivo é o fator de segurança que mostra que a espessura de 3.25mm para ambos materiais é a que tem mais capacidade para aguentar as cargas aplicadas, embora a 2.5mm também seja capaz de tolerar cargas moderadas.

Em suma, podemos deduzir que se for para um uso leve e onde serão aplicadas cargas mais baixas, a espessura de 2.5mm conseguirá cumprir melhor o propósito do que a espessura de 1.75mm que servirá apenas para um uso sem cargas aplicadas. Do ponto de vista funcional, a ortótese com espessura de 3.25mm tolera melhor as cargas aplicadas. Para o cenário de uso da ortótese de aplicação biocompatível também será melhor optar pela espessura 3.5mm por, mais uma vez, garantir a estabilidade durante o uso.

Sabendo que a espessura ideal para reduzir a probabilidade de deformar ou quebrar e aumentar a confiabilidade da ortótese é a de 3.25mm, comparou-se o tempo de impressão e o material consumido para cada uma das espessuras de forma perceber o impacto desta alteração. Os resultados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Impacto da alteração da espessura na simulação de prototipagem da ortótese

| Resina | Modelo | Espessura (mm) | Tempo de impressão | Quantidade de material consumido (g) |
|-------------|------------|----------------|--------------------|--------------------------------------|
| Rigid white | Part 1 e 2 | 2.5 | 9:30:00 | 171,3 |
| | Part 1 e 2 | 1.75 | 9:30:00 | 137,2 |
| | Part 1 e 2 | 3.25 | 9:30:00 | 204,5 |
| PRO-BLK 10 | Part 1 e 2 | 2.5 | 6:57:00 | 171,3 |
| | Part 1 e 2 | 1.75 | 6:57:00 | 139,8 |
| | Part 1 e 2 | 3.25 | 6:57:00 | 209,1 |

Observando os resultados retirados das simulações de impressão dos modelos alterados com a variante de espessura, é possível ver que uma vez que a altura da peça se mantém, o tempo de impressão não se altera quando comparado com a primeira simulação da espessura 2.5mm. Quanto ao material consumido tanto para PRO-BLK 10 como para o Rigid white, observa-se que quanto mais grossa a espessura da peça, mais material se consome. Consequentemente, como foi visto anteriormente, quanto mais material consumido, mais cara será a produção quando comparada com a original. Para combater a questão do peso da peça ao se optar por fabricar a ortótese com a espessura de 3.25mm, podem ser reforçados os locais onde vão ser aplicadas as forças externas e dar uma espessura mais fina na restante peça.

6. Conclusões

A integração de digitalização 3D, modelação CAD e fabrico aditivo revelou-se eficaz na conceção de ortóteses personalizadas, permitindo um desenvolvimento mais rápido, preciso e adaptado ao utilizador quando comparado às metodologias tradicionais.

Os resultados obtidos demonstraram que a espessura de 1,75mm é insuficiente em termos estruturais, apresentando deslocamentos elevados e fatores de segurança próximos de 1 para cargas elevadas, tornando-a inadequada para aplicações funcionais e restringindo o uso a esforços mínimos. A espessura de 2,50mm (usada originalmente para o *design* da ortótese) mostrou-se, adequada para cargas moderadas, garantindo equilíbrio entre desempenho, conforto e redução de peso, embora apresente fatores de segurança inferiores a 2 em condições de cargas de 100N. Já a espessura de 3,25mm evidenciou o melhor desempenho mecânico, assegurando deslocamentos reduzidos e fatores de segurança superiores a 2 em todos os cenários, sendo a opção mais indicada para utilização em condições exigentes, garantindo segurança estrutural em ambos materiais testados.

Relativamente aos materiais, quando a biocompatibilidade é fundamental como requisito clínico, deve-se optar pelo Rigid White nesta espessura, no entanto, se a prioridade for apenas o desempenho mecânico, o PRO-BLK 10 oferece uma ligeira vantagem no fator de segurança.

Em termos práticos, para aplicações funcionais e cargas elevadas, recomenda-se a utilização de espessuras maiores e preferencialmente em material biocompatível sempre que a ortótese estiver em contacto direto com a pele. Para aplicações leves ou de curta duração, a espessura de 2,50mm constitui um bom compromisso entre conforto e rigidez. Sugere-se ainda a adoção de reforços locais ou otimizações geométricas em detrimento de aumentos globais de espessura, de modo a reduzir o peso sem comprometer a segurança.

Para além das simulações, este trabalho permitiu ainda discutir a aplicabilidade de diferentes tecnologias de impressão. A tecnologia MJP destacou-se pela qualidade superficial e pela redução do tempo de trabalho do operador pelo pós-processamento simplificado. Adicionalmente, para ortóteses aplicadas em zonas com elevada mobilidade, como articulações, a possibilidade de mistura de materiais oferecida pelo MJP representa um

benefício acrescido, permitindo maior flexibilidade e conforto. Contudo, estas impressoras MJP apresentam limitações quanto ao volume de impressão, o que pode inviabilizar a produção de ortóteses de maiores dimensões. Neste aspeto, as tecnologias SLA oferecem melhor resposta, colmatando a principal desvantagem do DLP, que é o volume limitado de fabrico. Ainda assim, o DLP demonstrou ser a mais equilibrada em termos de custo, tempo de fabrico e desempenho mecânico, destacando-se como a opção globalmente mais eficiente segundo a análise multicritério AHP.

Outro fator a considerar é a orientação de impressão, que influencia diretamente o desempenho mecânico, principalmente em tecnologias com materiais que não são considerados isotrópicos. Na configuração a utilizar, deve ser considerada a orientação da construção das camadas, pois face à aplicação de forças externas, poderá reduzir a resistência da peça e poderá levá-la a ceder mais facilmente. Adicionalmente, parâmetros como a cura UV e as condições de pós-processamento afetam as propriedades finais do material, pelo que devem ser cuidadosamente controlados.

Em termos de personalização, o processo permite introduzir elementos de *design* na fase de modelação, como os losangos utilizados neste estudo, e complementá-los em etapas finais com pintura e acabamento. O *design* selecionado também permite otimizar os valores do modelo, que como foi analisado, quanto mais material, maior o seu custo final. A possibilidade de personalização estética e funcional, amplia ainda mais o potencial clínico e comercial do fabrico aditivo aplicado à ortoprotesia.

Do ponto de vista organizacional, possuir equipamento próprio, conhecimento na matéria e materiais disponíveis, elimina a necessidade de subcontratação, permitindo acelerar a entrega das ortóteses ao paciente. O custo final do produto dependerá da margem definida pelo fabricante, uma vez que o processo em si já reduz custos associados a transportes e terceiros, representando flexibilidade em termos de modelo de negócio.

6.1. Trabalhos futuros

Sugiro realizar ensaios mecânicos num protótipo, levando a uma melhor análise topográfica e uma análise do desempenho do mesmo pelo uso durante a situação de necessidade inicial. Quanto ao método aplicado neste trabalho, sugiro uma nova análise para outros segmentos corporais e para um estudo de produções maiores.

Referências Bibliográficas

- [1] G. Baronio, S. Harran, and A. Signoroni, “A Critical Analysis of a Hand Orthosis Reverse Engineering and 3D Printing Process,” *Appl Bionics Biomech*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/8347478.
- [2] J. Regina, A. Da, S. Supervisor, and J. Tavares, “Avaliação e Certificação de dispositivos Protéticos e Ortéticos para o Membro Inferior,” 2014.
- [3] “Ortótese impressão 3D ,” <https://www.gobetago.com.br/2016/06/06/designer-usa-imprensa-3d-para-criar-ortese-mais-eficiente-que-o-gesso/>. Accessed: Jun. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.gobetago.com.br/2016/06/06/designer-usa-imprensa-3d-para-criar-ortese-mais-eficiente-que-o-gesso/>
- [4] B. Štefanovič *et al.*, “Orthoses Development Using Modern Technologies,” in *Prosthetics and Orthotics*, IntechOpen, 2021. doi: 10.5772/intechopen.95463.
- [5] D. Bourell *et al.*, “Materials for additive manufacturing,” *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 66, no. 2, pp. 659–681, 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.05.009.
- [6] M. Pagac *et al.*, “A review of vat photopolymerization technology: Materials, applications, challenges, and future trends of 3d printing,” Feb. 02, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/polym13040598.
- [7] M. Salmi, “Additive manufacturing processes in medical applications,” Jan. 01, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/ma14010191.
- [8] P. Fiedor and J. Ortyl, “A new approach to micromachining: High-precision and innovative additive manufacturing solutions based on photopolymerization technology,” *Materials*, vol. 13, no. 13, pp. 1–25, Jul. 2020, doi: 10.3390/ma13132951.
- [9] D. Bourell *et al.*, “Materials for additive manufacturing,” *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 66, no. 2, pp. 659–681, 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.05.009.
- [10] “3D Systems - SLA,” 2023, Accessed: Apr. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.3dsystems.com/stereolithography#whyUseSLA>
- [11] R. Chand, V. S. Sharma, R. Trehan, M. K. Gupta, and M. Sarikaya, “Investigating the Dimensional Accuracy and Surface Roughness for 3D Printed Parts Using a Multi-jet Printer,” *J Mater Eng Perform*, vol. 32, no. 3, pp. 1145–1159, Feb. 2023, doi: 10.1007/s11665-022-07153-0.
- [12] T. E. Simpson and J. E. Barnes, “Additive Manufacturing Essentials SENIOR CONTRIBUTING AUTHORS,” 2025.

- [13] A. al Rashid, W. Ahmed, M. Y. Khalid, and M. Koç, “Vat photopolymerization of polymers and polymer composites: Processes and applications,” Nov. 01, 2021, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.addma.2021.102279.
- [14] P. Lakkala, S. R. Munnangi, S. Bandari, and M. Repka, “Additive manufacturing technologies with emphasis on stereolithography 3D printing in pharmaceutical and medical applications: A review,” *Int J Pharm X*, vol. 5, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.ijpx.2023.100159.
- [15] O. Santoliquido, P. Colombo, and A. Ortona, “Additive Manufacturing of ceramic components by Digital Light Processing: A comparison between the ‘bottom-up’ and the ‘top-down’ approaches,” *J Eur Ceram Soc*, vol. 39, no. 6, pp. 2140–2148, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2019.01.044.
- [16] S. Zakeri, M. Vippola, and E. Levänen, “A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography,” Oct. 01, 2020, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.addma.2020.101177.
- [17] C. A. G. Lengua, “History of rapid prototyping,” in *Rapid Prototyping in Cardiac Disease: 3D Printing the Heart*, Springer International Publishing, 2017, pp. 3–7. doi: 10.1007/978-3-319-53523-4_1.
- [18] “FormLabs - Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing,” 2024, Accessed: Apr. 04, 2024. [Online]. Available: <https://formlabs.com/eu/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>
- [19] “Stereolithography Printers Prototypes, tools and production parts with stereolithography (SLA) 3D printers,” 2022.
- [20] J. Zhang, Q. Hu, and S. Wang, “Digital light processing based 3D printing for medical applications,” *Int J Bioprint*, vol. 6, no. 1, pp. 1–16, 2020, doi: 10.18063/ijb.v6i1.1-16.
- [21] D. Xue, J. Zhang, Y. Wang, and D. Mei, “Digital Light Processing-Based 3D Printing of Cell-Seeding Hydrogel Scaffolds with Regionally Varied Stiffness,” *ACS Biomater Sci Eng*, vol. 5, no. 9, pp. 4825–4833, Sep. 2019, doi: 10.1021/acsbiomaterials.9b00696.
- [22] J. Zhang, Q. Hu, S. Wang, J. Tao, and M. Gou, “Digital light processing based three-dimensional printing for medical applications,” *Int J Bioprint*, vol. 6, no. 1, pp. 12–27, 2020, doi: 10.18063/ijb.v6i1.242.
- [23] Parenti Matteo, “Impressora 3D DLP vs LCD: as principais diferenças.” Accessed: Jun. 06, 2024. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/lcd-vs-dlp-3d-printing-technologies-compared/>

- [24] “Figure 4.” Accessed: Jul. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.3dsystems.com/3d-printers/figure-4>
- [25] “What is SLA printing? The original resin 3D print method,” <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>. Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>
- [26] D. Wu, Z. Zhao, Q. Zhang, H. J. Qi, and D. Fang, “Mechanics of shape distortion of DLP 3D printed structures during UV post-curing,” *Soft Matter*, vol. 15, no. 30, pp. 6151–6159, 2019, doi: 10.1039/c9sm00725c.
- [27] C. Mendes-Felipe, J. Oliveira, I. Etxebarria, J. L. Vilas-Vilela, and S. Lanceros-Mendez, “State-of-the-Art and Future Challenges of UV Curable Polymer-Based Smart Materials for Printing Technologies,” Mar. 01, 2019, *Wiley-Blackwell*. doi: 10.1002/admt.201800618.
- [28] “Post processing for SLA printed parts.” Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: https://www.hubs.com/knowledge-base/post-processing-sla-printed-parts/?_gl=1*4xkcf2*_up*MQ..*_ga*MTQwMDI4MzQyMC4xNzEzODk2ODkx*_ga_T960KNB2NB*MTcxMzg5Njg5MS4xLjAuMTcxMzg5Njg5MS4wLjAuMTkzNjc1NjIwNA..
- [29] “Cost and Time Savings with Clear Parts 3D Printing,” Nov. 2023.
- [30] M. Johnson, “Common Sterilization Methods and 3D Systems’ Plastic 3D Printing Materials Assessing the Impact on Material Properties of Sterilization Using Autoclave, EtO, Novel Gas, Gamma, and E-Beam Methods,” 2022.
- [31] S. Y. Yoo, S. K. Kim, S. J. Heo, J. Y. Koak, and J. G. Kim, “Dimensional accuracy of dental models for three-unit prostheses fabricated by various 3D printing technologies,” *Materials*, vol. 14, no. 6, Mar. 2021, doi: 10.3390/ma14061550.
- [32] G. R. Dunne C., “3D Systems’ ProJet MJP 2500 Series Affordable, Easy-to-Use System Lowers Barriers to High-Precision 3D Printing,” 2016.
- [33] “MultiJet Print.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.3dsystems.com/multi-jet-printing>
- [34] 3D Systems, “EasyClean Post Processing Guide for All MJP Materials.” Accessed: Dec. 27, 2024. [Online]. Available: https://support.3dsystems.com/s/article/projet-mjp-5500x-easyclean-post-processing-guide-for-all-mjp-materials?language=pt_BR&redirect=yes#
- [35] “ProJet MJP 2500 Series_MultiJet Printing Post Processing 33-D260_Rev B (1),” 2021.

- [36] “dassault systemes - SLA.” Accessed: Apr. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/make/service/3d-printing-service/sla-stereolithography>
- [37] O. Gülcan, K. Günaydın, and A. Tamer, “The state of the art of material jetting—a critical review,” Aug. 02, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/polym13162829.
- [38] H. Quan, T. Zhang, H. Xu, S. Luo, J. Nie, and X. Zhu, “Photo-curing 3D printing technique and its challenges,” Mar. 01, 2020, *KeAi Communications Co*. doi: 10.1016/j.bioactmat.2019.12.003.
- [39] “Material finder,” 2025, Accessed: Sep. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.3dsystems.com/material-finder>
- [40] B. Huzum *et al.*, “Biocompatibility assessment of biomaterials used in orthopedic devices: An overview (Review),” *Exp Ther Med*, vol. 22, no. 5, Sep. 2021, doi: 10.3892/etm.2021.10750.
- [41] M. T. Hossain *et al.*, “Research and application of polypropylene: a review,” Dec. 01, 2024, *Springer*. doi: 10.1186/s11671-023-03952-z.
- [42] S. Zhang, B. Wang, X. Meng, and Y. Chen, “Mechanical Properties and Fracture Microstructure of Polycarbonate under High Strain Rate Tension,” *Materials*, vol. 16, no. 9, May 2023, doi: 10.3390/ma16093386.
- [43] S. Guessasma and S. Belhabib, “The Influence of Microstructural Arrangement on the Failure Characteristics of 3D-Printed Polymers: Exploring Damage Behaviour in Acrylonitrile Butadiene Styrene,” *Materials*, vol. 17, no. 11, Jun. 2024, doi: 10.3390/ma17112699.

Anexos

Anexo I

| Tecnologia SLA segundo orientação ZX | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------|---------------|---------------------|-----------------------|----------------|
| | Tensile Strength Ultimate | Tensile Strength at Yield | Tensile Modulus | Elongation at Break | Elongation at Yield | Flex Strength | Flex Modulus | Izod Notched Impact | Izod unnotched impact | Shore Hardness |
| ASTM Method | ASTM D638 | ASTM D638 | ASTM D638 | ASTM D638 | ASTM D638 | ASTM D790 | ASTM D790 | ASTM D256 | ASTM D2240 | ASTM D2240 |
| Accura AMX High Temp 300C | 59 MPa | Did not yield | 3500 MPa | 2.2 % | Did not yield | 117 MPa | 3400 MPa | 10 J/m | 70 J/m | 88 D |
| Accura AMX Tough FR V0 Black | 33 MPa | 33 MPa | 1300 MPa | 35.5 % | 5.4 % | 38 MPa | 1000 MPa | 33 J/m | 460 J/m | 77 D |
| Accura Xtreme white 200 | 48 MPa | | 2630 MPa | 14 % | | 74 MPa | 2390 MPa | 65 J/m | | 80 D |
| Accura Xtreme | 41 MPa | | 1890 MPa | 18 % | | 62 MPa | 1850 MPa | 44 J/m | | 86 D |
| Accura ABS Black | 45-47 MPa | | 1890-2440 MPa | 6-13 % | | 75-78 MPa | 2260-2370 MPa | 39-56 J/m | | 86 D |
| Accura AMX Durable Natural | 32 MPa | 25 MPa | 1000 MPa | 80 % | 7.3 % | 20 MPa | 590 MPa | 64 J/m | 1230 J/m | 64 D |
| Accura ClearVue | 52 MPa | | 2560 MPa | 6 % | | 83 MPa | 2330 MPa | 46 J/m | | 85 D |
| Accura AMX Rigid Black | 52 MPa | 52 MPa | 2100 MPa | 24 % | 4.5 % | 88 MPa | 2300 MPa | 23 J/m | 170 J/m | 80 D |
| Accura 25 | 38 MPa | | 1590-1660 MPa | 13-20 % | | 55-58 MPa | 1380-1660 MPa | 19-24 J/m | | 80 D |

| Tecnologia DLP segundo orientação ZX | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------|--------------|---------------------|-----------------------|----------------|
| | Tensile Strength Ultimate | Tensile Strength at Yield | Tensile Modulus | Elongation at Break | Elongation at Yield | Flex Strength | Flex Modulus | Izod Notched Impact | Izod unnotched impact | Shore Hardness |
| ASTM Method | ASTM D638 | ASTM D638 | ASTM D638 | ASTM D638 | ASTM D638 | ASTM D790 | ASTM D790 | ASTM D256 | ASTM D2240 | ASTM D624 |
| Fig 4 Tough Clear | 52 MPa | 52 MPa | 2300 MPa | 12.3% | 3.8% | 72 MPa | 2200 MPa | 19 J/m | 460 J/m | 81 D |
| Fig 4 Tough 60C White | 35 MPa | 35 MPa | 1500 MPa | 23 % | 7.1 % | 52 MPa | 1500 MPa | 34 J/m | 90 J/m | 79 D |
| Fig 4 Tough 65C Black | 41 MPa | 40 MPa | 1700 MPa | 35 % | 6.6 % | 60 MPa | 1600 MPa | 31 J/m | 100 J/m | 81 D |
| Fig 4 Tough 75C FR Black | 31 MPa | | 1200 MPa | 7.8 % | | 45 MPa | 1200 MPa | 17 J/m | 210 J/m | 79 D |
| Fig 4 Tough FR V0 Black | 38 MPa | 35 MPa | 1400 MPa | 44.6 % | 5.6 % | 48 MPa | 1300 MPa | 35 J/m | 770 J/m | 78 D |
| Fig 4 Tough-BLK 20 | 40 MPa | 40 MPa | 1780 MPa | 36% | 4.6% | 61 MPa | 1650 MPa | 27 J/m | 1008 J/m | 79D |
| Fig 4 Tough-Gry 15 | 48 MPa | | 2120 MPa | 35 % | 4 % | 73 MPa | 1960 MPa | 32 J/m | 599 J/m | 82D |
| Fig 4 Tough-Gry 10 | 50 MPa | | 2180 MPa | 25 % | 4 % | 75 MPa | 2070 MPa | 29 J/m | 598 J/m | 81D |

Comparação da produção de uma ortótese através de processos de Estereolitografia (SLA), Processamento de Luz Digital (DLP) e *MultiJet Printing* (MJP)

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------|--------|----------|------|-------|---------|----------|--------|---------|------|
| Fig 4 High Temp 150C FR Black | 58 MPa | N/A | 2600 MPa | 4 % | N/A | 100 MPa | 2900 MPa | 10 J/m | 50 J/m | 85 D |
| Fig 4 Rigid Gray | 61 MPa | 61 MPa | 2400 MPa | 30 % | 4.6 % | 87 MPa | 2200 MPa | 21 J/m | 150 J/m | 82 D |
| Fig 4 Rigid White | 57 MPa | 57 MPa | 2100 MPa | 20 % | 4.5 % | 84 MPa | 2200 MPa | 21 J/m | 160 J/m | 81D |
| Fig 4 PRO-BLK 10 | 63 MPa | 63 MPa | 2320 MPa | 12% | 4.7% | 92 MPa | 2290 MPa | 24 J/m | 614 J/m | 79D |
| Fig 4 MED-AMB 10 | 69 MPa | | 2760 MPa | 4% | | 111 MPa | 2810 MPa | 18 J/m | 220 J/m | 84D |

| Tecnologia MJP segundo orientação YX | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------|--------------|---------------------|-----------------------|----------------|
| | Tensile Strength Ultimate | Tensile Strength at Yield | Tensile Modulus | Elongation at Break | Elongation at Yield | Flex Strength | Flex Modulus | Izod Notched Impact | Izod unnotched impact | Shore Hardness |
| ASTM Method | ASTM D638 | ASTM D638 | ASTM D638 | ASTM D638 | ASTM D638 | ASTM D790 | ASTM D790 | ASTM D256 | ASTM D2240 | ASTM D2240 |
| VisiJet Armor Max | 32 MPa | 32 MPa | 1800 MPa | 34 % | N/A | 35 MPa | 1028 MPa | 25 J/m | N/A | 77 D |
| VisiJet ProFlex (M2G-DUR) | 20 MPa | N/A | 300 MPa | 72 % | N/A | 4 MPa | 160 MPa | 73 J/m | N/A | 62 D |
| VisiJet M2R-TN | 65 MPa | N/A | 2900 MPa | 4.2 % | N/A | 99 MPa | 2900 MPa | 14 J/m | N/A | 80 D |
| VisiJet M2R-GRY | 46 MPa | 46 MPa | 2000 MPa | 16 % | 4.3 % | 57 MPa | 1500 MPa | 17 J/m | N/A | 79 D |
| VisiJet Armor (M2G-CL) | 31 MPa | 31 MPa | 1400 MPa | 63 % | 4.1 % | 47 MPa | 1300 MPa | 48 J/m | N/A | 74 D |
| VisiJet M2R-CL | 42 MPa | 41 MPa | 1980 MPa | 16 % | 4.5 % | 59 MPa | 59 MPa | 16 J/m | N/A | 76 D |
| VisiJet M2E-BK70 | 2.1 MPa | N/A | 5.7 MPa | 37 % | N/A | | | | | 72 A |
| VisiJet M2S-HT250 | 56 MPa | N/A | 3500 MPa | 2 % | N/A | 89 MPa | 3400 MPa | 10 J/m | N/A | 85 D |

Anexo II

SLA – Impressora *ProJet 6000HD*

| Resina | Valor da embalagem | Número de conjuntos | Suporte | Tempo de impressão | Quantidade estimada (cm ³) | VAT level (%) |
|------------------------------|--------------------|---------------------|---------|--------------------|--|---------------|
| Accura AMX High Temp 300C | ●● | 1 | Sem | 20:39:00 | 86,579 | -0,508 |
| | | | Com | 25:32:00 | 457,546 | -2,685 |
| | | 5 | Sem | 31:52:00 | 432,895 | -2,54 |
| | | | Com | 52:53:00 | 2332,386 | -13,686 |
| Accura AMX Tough FR V0 Black | ●●●●● | 1 | Sem | 12:36:00 | 86,022 | -0,505 |
| | | | Com | 16:27:00 | 311,594 | -1,828 |
| | | 5 | Sem | 17:54:00 | 430,109 | -2,524 |
| | | | Com | 34:27:00 | 1660,806 | -9,745 |
| Accura Xtreme white 200 | ●●● | 1 | Sem | 10:01:00 | 86,1 | -0,505 |
| | | | Com | 15:18:00 | 106,487 | -0,625 |
| | | 5 | Sem | 16:26:00 | 430,502 | -2,526 |
| | | | Com | 40:18:00 | 526,258 | -3,088 |
| Accura Xtreme | ●●● | 1 | Sem | 21:27:00 | 86,022 | -0,505 |
| | | | Com | 25:20:00 | 105,816 | -0,621 |
| | | 5 | Sem | 30:58:00 | 430,109 | -2,524 |
| | | | Com | 48:49:00 | 525,865 | -3,086 |

Comparação da produção de uma ortótese através de processos de Estereolitografia (SLA), Processamento de Luz Digital (DLP) e *MultiJet Printing* (MJP)

| | | | | | | |
|----------------------------|-----|---|-----|-----------|---------|--------|
| Accura ABS Black | ●●● | 1 | Sem | 10:34:00 | 85,545 | -0,502 |
| | | | Com | 15:09:00 | 103,679 | -0,608 |
| | | 5 | Sem | 23:50:00 | 427,724 | -2,51 |
| | | | Com | 46:37:00 | 523,483 | -3,072 |
| Accura AMX Durable Natural | ● | 1 | Sem | 18:10:00 | 87,023 | -0,511 |
| | | | Com | 43:06:00 | 127,699 | -0,749 |
| | | 5 | Sem | 45:44:00 | 435,112 | -2,553 |
| | | | Com | 173:11:00 | 649,704 | -3,812 |
| Accura ClearVue | ●●● | 1 | Sem | 19:52:00 | 86,022 | -0,505 |
| | | | Com | 22:52:00 | 105,077 | -0,617 |
| | | 5 | Sem | 25:57:00 | 430,11 | -2,524 |
| | | | Com | 39:39:00 | 526,146 | -3,087 |
| Accura AMX Rigid Black | ●●● | 1 | Sem | 10:46:00 | 85,466 | -0,501 |
| | | | Com | 17:28:00 | 122,056 | -0,716 |
| | | 5 | Sem | 20:22:00 | 427,332 | -2,507 |
| | | | Com | 53:28:00 | 618,54 | -3,629 |
| Accura 25 | ●●● | 1 | Sem | 8:52:00 | 86,021 | -0,505 |
| | | | Com | 15:24:00 | 105,816 | -0,621 |
| | | 5 | Sem | 15:21:00 | 430,109 | -2,574 |
| | | | Com | 45:54:00 | 525,865 | -3,086 |

SLA – Impressora *ProJet 7000HD*

| Resina | | Número de conjuntos | Suporte | Tempo de impressão | Quantidade estimada (cm ³) | VAT level (%) |
|------------------------------|-------|---------------------|---------|--------------------|--|---------------|
| Accura AMX High Temp 300C | ●● | 1 | Sem | 24:53:00 | 84,912 | -0,221 |
| | | | Com | 31:48:00 | 489,174 | -1,276 |
| | | 5 | Sem | 45:52:00 | 424,562 | -1,107 |
| | | | Com | 76:30:00 | 2426,969 | -6,329 |
| Accura AMX Tough FR V0 Black | ●●●●● | 1 | Sem | 19:09:00 | 86,579 | -0,226 |
| | | | Com | 24:15:00 | 413,343 | -1,078 |
| | | 5 | Sem | 25:48:00 | 432,896 | -1,129 |
| | | | Com | 47:37:00 | 2068,211 | -5,394 |
| Accura Xtreme white 200 | ●●● | 1 | Sem | 12:01:00 | 86,022 | -0,224 |
| | | | Com | 16:56:00 | 104,961 | -0,274 |
| | | 5 | Sem | 18:55:00 | 430,109 | -1,122 |
| | | | Com | 44:13:00 | 532,622 | -1,389 |
| Accura Xtreme | ●●● | 1 | Sem | 23:22:00 | 81,202 | -0,212 |
| | | | Com | 27:48:00 | 100,141 | -0,261 |
| | | 5 | Sem | 33:14:00 | 406,009 | -1,059 |
| | | | Com | 55:46:00 | 508,522 | -1,326 |
| Accura ABS Black | ●●● | 1 | Sem | 12:42:00 | 88,496 | -0,231 |
| | | | Com | 17:25:00 | 107,436 | -0,28 |
| | | 5 | Sem | 27:01:00 | 442,481 | -1,154 |
| | | | Com | 51:11:00 | 544,895 | -1,421 |
| Accura AMX Durable Natural | ● | 1 | Sem | 19:41:00 | 87,022 | -0,227 |
| | | | Com | 43:51:00 | 129,498 | -0,338 |
| | | 5 | Sem | 45:54:00 | 435,111 | -1,135 |
| | | | Com | 168:26:00 | 656,891 | -1,713 |
| Accura ClearVue | ●●● | 1 | Sem | 21:50:00 | 86,1 | -0,225 |
| | | | Com | 25:03:00 | 105,039 | -0,274 |
| | | 5 | Sem | 28:20:00 | 430,5 | -1,123 |
| | | | Com | 44:19:00 | 533,013 | -1,39 |
| Accura AMX Rigid Black | ●●● | 1 | Sem | 12:39:00 | 85,466 | -0,233 |
| | | | Com | 19:27:00 | 124,442 | -0,325 |
| | | 5 | Sem | 22:23:00 | 427,33 | -1,114 |
| | | | Com | 56:38:00 | 632,594 | -1,65 |
| Accura 25 | ●●● | 1 | Sem | 12:14:00 | 88,025 | -0,23 |
| | | | Com | 20:02:00 | 107,595 | -0,281 |
| | | 5 | Sem | 20:09:00 | 440,121 | -1,148 |
| | | | Com | 59:39:00 | 542,531 | -1,415 |

Anexo III



Figure 4® PRO-BLK 10

Production Rigid

Production-grade additive manufacturing material with game-changing thermoplastic-like mechanical properties and long-term environmental stability

Figure 4

VERSATILE RIGID HEAT-RESISTANT MATERIAL COMBINES SPEED, STRENGTH, EXCELLENT MECHANICAL PROPERTIES FOR TOOL-LESS, DIRECT PRODUCTION OF PLASTIC PARTS

Figure 4® PRO-BLK 10 delivers on the promise of additive manufacturing with true direct digital production of plastic parts. Go from CAD to manufacturing line in one day with tool-less, same day part production. With a fast print speed and simplified post-processing that includes a single curing cycle and single solvent cleaning, this material delivers exceptional throughput. It is a high precision resin producing parts with a smooth surface finish and sidewall quality, and has excellent mechanical properties and long-term environmental stability that brings a new level of assurance to 3D production.

HANDLING AND POST-PROCESSING GUIDELINES

Proper mixing, cleaning, drying and curing is required for this material. Post-processing information can be found at the end of this document.

Note: all properties are based on using the documented post-processing method. Any deviation from this method could yield a different result.

More details can be found in the Figure 4 User Guide available at <http://infocenter.3dsystems.com>

Figure 4 Standalone:

<http://infocenter.3dsystems.com/figure4standalone/node/1546>

Figure 4 Modular:

<http://infocenter.3dsystems.com/figure4modular/node/1741>

Note: Not all products and materials are available in all countries — please consult your local sales representative for availability.

APPLICATIONS

- Tool-less, same day production
- Direct production of small black plastic parts; examples include: motor housings, connectors, snap-fits, automotive interior and other general-use parts
- Digital production to replace injection molding or soft tooling processes

BENEFITS

- Improved environmental stability of mechanical and performance properties over time
- Fast throughput for part-in-hand with no secondary thermal cure required
- Simple, single solvent cleaning
- Excellent surface quality and repeatability
- Accurate, low distortion material for fast first article print success

FEATURES

- Fast print speed up to 62 mm/hr at 50 micron layer thickness
- 70 °C heat deflection temperature, 12% elongation at break
- Durability and strength
- UL94 HB flammability
- Biocompatible capable per ISO10993-5 and ISO10993-10
- Exhibits thermoplastic behavior in necking at tensile break point





Figure 4 PRO-BLK 10

MATERIAL PROPERTIES

The full suite of mechanical properties are given per ASTM and ISO standards where applicable. In addition, properties such as flammability, dielectric properties, and 24 hour water absorption. This allows for better understanding of the material capability to aid in design decisions for the material. All parts are conditioned per ASTM recommended standards for a minimum of 40 hours at 23 °C, 50% RH.

Solid material properties reported were printed along the vertical axis (ZY-orientation). Figure 4 material properties are relatively uniform across print orientations, as detailed in the following section on Isotropic Properties. Because of this, parts do not need to be oriented in a particular direction to exhibit these properties.

| LIQUID MATERIAL | | | | | | |
|--|---|--|--------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| MEASUREMENT | CONDITION/METHOD | METRIC | | ENGLISH | | |
| Viscosity | Brookfield Viscometer @ 25 °C (77 °F) | 293 cps | | 709 lb/ft-hr | | |
| Color | | Black | | | | |
| Liquid Density | Kruss K11 Force Tensiometer @ 25 °C (77 °F) | 1.07 g/cm ³ | | 0.039 lb/in ³ | | |
| Default Print Layer Thickness (Standard Mode) | | 0.05 mm | | 0.002 in | | |
| Speed - Standard Mode | | 62 mm/hr | | 2.4 in/hr | | |
| Speed - Draft Mode | | 81 mm/hr | | 3.2 in/hr | | |
| Package Volume | | 1 kg bottle - Figure 4 Standalone 2.5 kg cartridge - Figure 4 Modular 9 kg container - Figure 4 Production | | | | |
| SOLID MATERIAL | | | | | | |
| METRIC | ASTM METHOD | METRIC | ENGLISH | ISO METHOD | METRIC | ENGLISH |
| PHYSICAL | | | | PHYSICAL | | |
| Solid Density | ASTM D792 | 1.16 g/cm ³ | 0.042 lb/in ³ | ISO 1183 | 1.16 g/cm ³ | 0.042 lb/in ³ |
| 24 Hour Water Absorption | ASTM D570 | 1.16% | 1.16% | ISO 62 | 1.16% | 1.16% |
| MECHANICAL | | | | MECHANICAL | | |
| Tensile Strength Ultimate | ASTM D638 * | 63 MPa | 9140 psi | ISO 527 -1/2 | 58 MPa | 8348 psi |
| Tensile Strength at Yield | ASTM D638 | 63 MPa | 9140 psi | ISO 527 -1/2 | 58 MPa | 8348 psi |
| Tensile Modulus | ASTM D638 | 2320 MPa | 336 ksi | ISO 527 -1/2 | 2275 MPa | 330 ksi |
| Elongation at Break | ASTM D638 | 12% | 12% | ISO 527 -1/2 | 15 % | 15 % |
| Elongation at Yield | ASTM D638 | 4.7% | 4.7% | ISO 527 -1/2 | 4.3 % | 4.3 % |
| Flex Strength | ASTM D790 | 92 MPa | 13340 psi | ISO 178 | 89 MPa | 12940 psi |
| Flex Modulus | ASTM D790 | 2290 MPa | 332 ksi | ISO 178 | 2783 MPa | 404 ksi |
| Izod Notched Impact | ASTM D256 | 24 J/m | 0.5 ft-lb/in | ISO 180-A | 2 J/m ² | 0.0009 ft-lb/in ² |
| Izod Unnotched Impact | ASTM D4812 | 614 J/m | 11.5 ft-lb/in | ISO 180-U | | |
| Shore Hardness | ASTM D2240 | 79D | 79D | ISO 7619 | 79D | 79D |
| THERMAL | | | | THERMAL | | |
| Tg (DMA, E'') | ASTM E1640 (E' at 1C/min) | 62 °C | 144 °F | ISO 6721-1/11 (E' at 1C/min) | 62 °C | 144 °F |
| HDT @ 0.455 MPa/66 PSI | ASTM D648 | 70 °C | 158 °F | ISO 75- 1/2 B | 67 °C | 153 °F |
| HDT @ 1.82 MPa/264 PSI | ASTM D648 | 56 °C | 133 °F | ISO 75-1/2 A | 55 °C | 132 °F |
| CTE below Tg | ASTM E831 | 71 ppm/°C | 39 ppm/°F | ISO 11359-2 | 71 ppm/°C | 39 ppm/°F |
| CTE above Tg | ASTM E831 | 188 ppm/°C | 104 ppm/°F | ISO 11359-2 | 188 ppm/°C | 104 ppm/°F |
| UL Flammability | UL94 | HB | HB | | | |
| ELECTRICAL | | | | ELECTRICAL | | |
| Dielectric Strength (V/mil) @ 3.0 mm thickness | ASTM D149 | 19.3 | | | | |
| Dielectric Constant @ 1 MHz | ASTM D150 | 3.17 | | | | |
| Dissipation Factor @ 1 MHz | ASTM D150 | 0.012 | | | | |
| Volume Resistivity (ohm-cm) | ASTM D257 | 2.6x10 ¹⁵ | | | | |

Figure 4 PRO-BLK 10

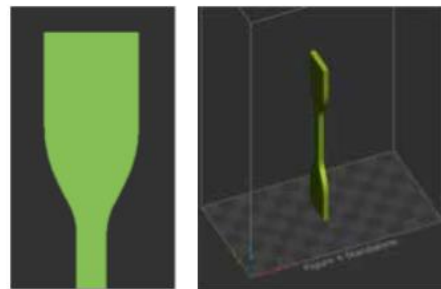


ISOTROPIC PROPERTIES

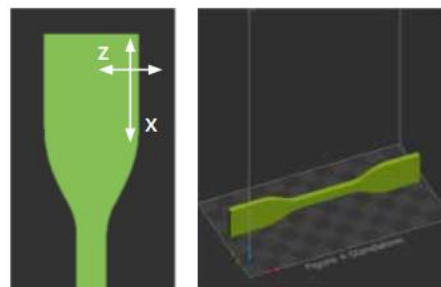
Figure 4 technology prints parts that are isotropic in mechanical properties meaning the parts printed along either the XYZ axis will give similar results.

Parts do not need to be oriented to get the highest mechanical properties, further improving the degree of freedom for part orientation for mechanical properties.

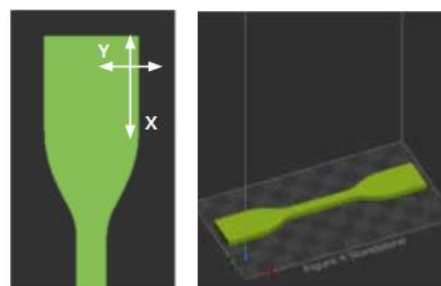
| SOLID MATERIAL | | | | | |
|---------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|
| METRIC | METHOD | METRIC | | | |
| MECHANICAL | | | | | |
| | | ZY | XZ | XY | Z45 |
| Tensile Strength Ultimate | ASTM D638 | 63 MPa | 56 MPa | 60 MPa | 57 MPa |
| Tensile Strength at Yield | ASTM D639 | 63 MPa | 56 MPa | 60 MPa | 57 MPa |
| Tensile Modulus | ASTM D640 | 2320 MPa | 2315 MPa | 2330 MPa | 2300 MPa |
| Elongation at Break | ASTM D641 | 12% | 12% | 13% | 11% |
| Elongation at Yield | ASTM D642 | 4.7% | 4.7% | 4.7% | 4.4% |
| Flex Strength | ASTM D790 | 92 MPa | 91 MPa | 90 MPa | 85 MPa |
| Flex Modulus | ASTM D790 | 2320 MPa | 2280 MPa | 2742 MPa | 2339 MPa |
| Izod Notched Impact | ASTM D256 | 24 J/m | 22 J/m | 23 J/m | 23 J/m |
| Shore Hardness | ASTM D2240 | 79D | 80D | 79D | 80D |



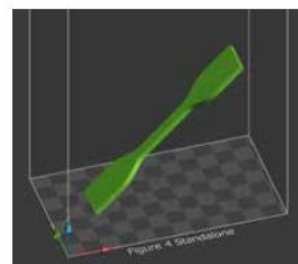
YZ - orientation



XZ - orientation



XY - orientation



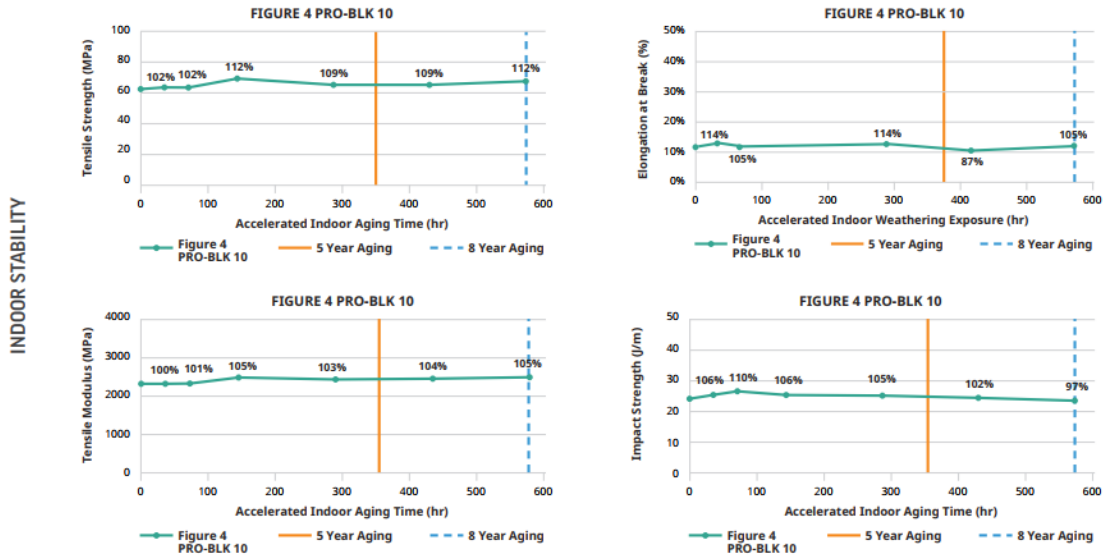
Z45-Degree - orientation

Figure 4 PRO-BLK 10

LONG TERM ENVIRONMENTAL STABILITY

Figure 4 PRO-BLK 10 is engineered to give long term environmental UV and humidity stability. This means the material is tested for the ability to retain a high percent of the initial mechanical properties over a given period of time. This provides real design conditions to consider for the application or part. **Actual data value is on Y-axis, and data points are % of initial value.**

INDOOR STABILITY: Tested per ASTM D4329 standard method.



OUTDOOR STABILITY: Tested per ASTM G154 standard method.

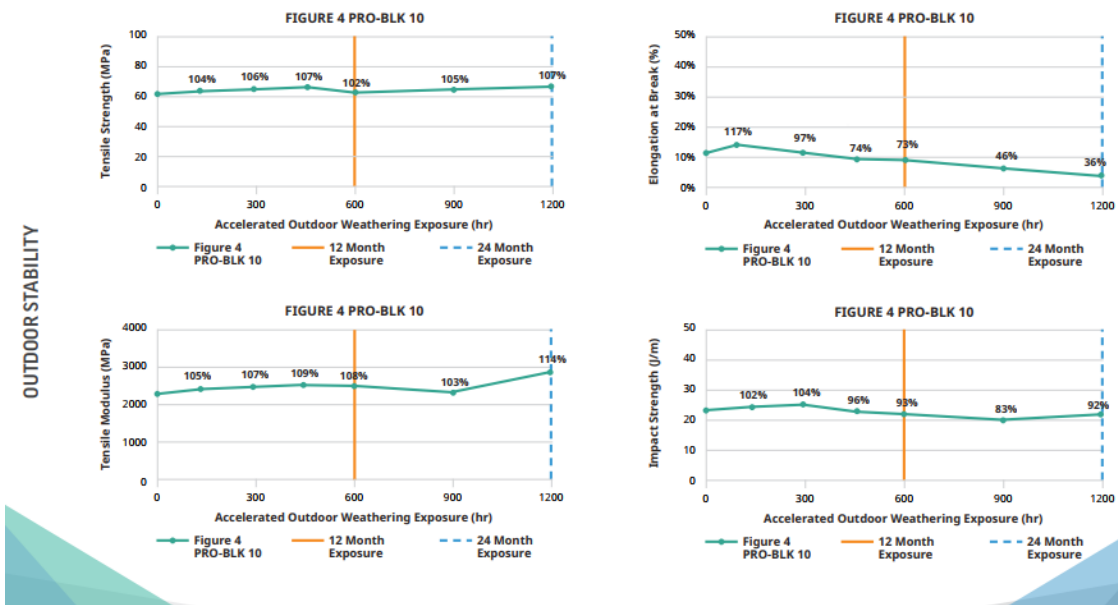


Figure 4 PRO-BLK 10



AUTOMOTIVE FLUID COMPATIBILITY

The compatibility of a material with hydrocarbons and cleaning chemicals is critical to part application. Figure 4 PRO-BLK 10 parts were tested for sealed and surface contact compatibility per USCAR2 test conditions. The fluids below were tested in two different ways per the specs.

- Immerse for 7-days, then take mechanical property data for comparison.
- Immerse for 30-minutes, remove, and take mechanical property data for comparison in 7-days

Data reflects the measured value of properties over that period of time.

| AUTOMOTIVE FLUIDS | | |
|-------------------------------|--|--------------|
| FLUID | SPECIFICATION | TEST TEMP °C |
| Gasoline | ISO 1817, liquid C | 23 ± 5 |
| Diesel Fuel | 905 ISO 1817, Oil No. 3 + 10% p-xylene* | 23 ± 5 |
| Engine Oil | ISO 1817, Oil No. 2 | 50 ± 3 |
| Ethanol | 85% Ethanol + 15% ISO 1817 liquid C* | 23 ± 5 |
| Power Steering Fluid | ISO 1917, Oil No. 3 | 50 ± 3 |
| Automotive Transmission Fluid | Dexron VI (North American specific material) | 50 ± 3 |
| Engine Coolant | 50% ethylene glycol + 50% distilled water* | 50 ± 3 |
| Brake Fluid | SAE RM66xx (Use latest available fluid for xx) | 50 ± 3 |
| Diesel Exhaust Fluid (DEF) | API certified per ISO 22241 | 23 ± 5 |

*Solutions are determined as percent by volume

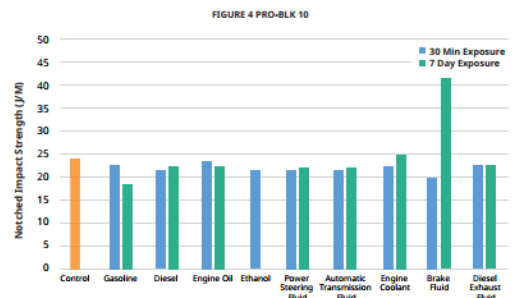
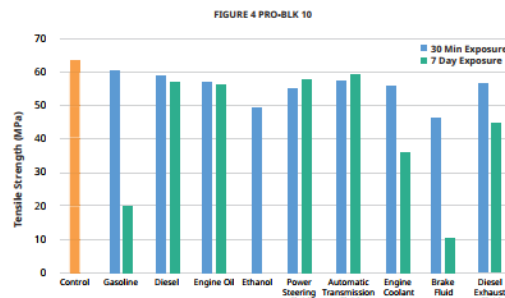
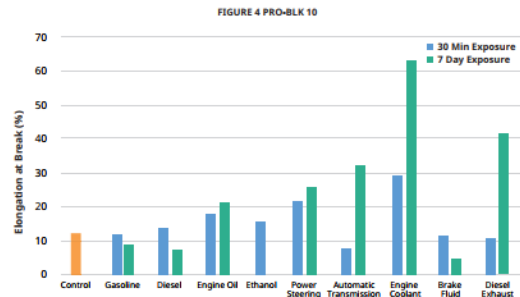
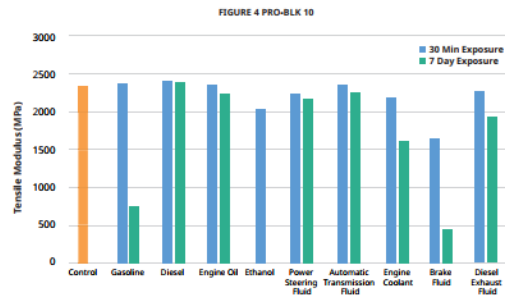




Figure 4 PRO-BLK 10

CHEMICAL COMPATIBILITY

The compatibility of a material with cleaning chemicals is critical to part application. Figure 4 PRO-BLK 10 parts were tested for sealed and surface contact compatibility per ASTM D543 test conditions. The fluids below were tested in two different ways per the specs.

- Immerse for 7-days, then take mechanical property data for comparison.
- Immerse for 30-minutes, remove, and take mechanical property data for comparison in 7-days

Data reflects the measured value of properties over that period of time.

*Denotes materials did not go thru 7-day soak conditioning.

| CHEMICAL COMPATIBILITY |
|--|
| 6.3.3 Acetone |
| 6.3.12 Detergent Solution, Heavy Duty |
| 6.3.23 Hydrochloric Acid (10%) |
| 6.3.38 Sodium Carbonate Solution (20%) |
| 6.3.44 Sodium Hypochlorite Solution |
| 6.3.46 Sulfuric Acid (30%) |
| 6.3.42 Sodium Hydroxide Soln (10%) |
| Distilled Water |

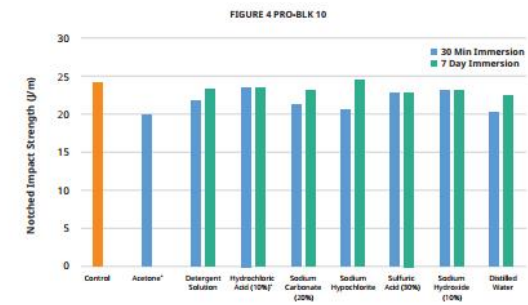
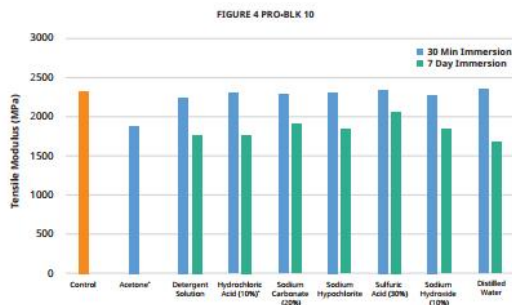
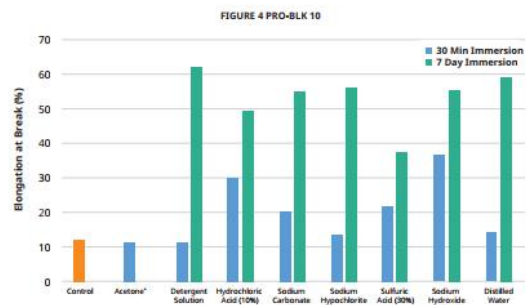
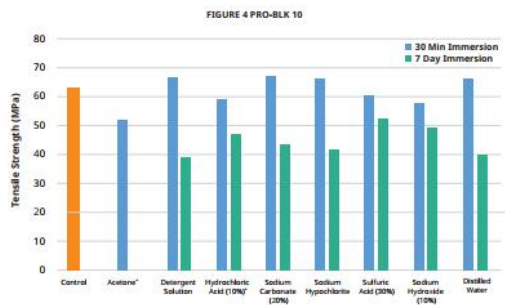


Figure 4 PRO-BLK 10



BIOCOMPATIBILITY STATEMENT

Figure 4® PRO-BLK 10 test coupons printed and processed according to the post processing instructions below were provided to an external biological testing laboratory for evaluation in accordance with *ISO 10993-5, Biological evaluation of medical devices - Part 5: Tests for in vitro cytotoxicity*, and *ISO 10993-10, Biological evaluation of medical devices - Part 10: Tests for irritation and skin sensitization (GPMT)*. The test results indicate that Figure 4® PRO-BLK 10 has passed the requirements for biocompatibility according to the above tests.

It is the responsibility of each customer to determine that its use of Figure 4® PRO-BLK 10 material is safe, lawful and technically suitable to the customer's intended applications. Customers should conduct their own testing to ensure that this is the case. Because of possible changes in the law and in regulations, as well as possible changes in these materials, 3D Systems cannot guarantee that the status of these materials will remain unchanged or that it will qualify as biocompatible in any particular use. Therefore, 3D Systems recommends that customers continuing to use these materials verify their status on a periodic basis.



Figure 4 PRO-BLK 10



POST-PROCESSING INSTRUCTIONS REQUIRED TO PASS ISO 10993-5 AND ISO 10993-10

MIXING INSTRUCTIONS

This material has a pigment that settles very slowly over time before printing. For best results mix material in the bottle:

1 kg bottle for Figure 4 Standalone

- Roll bottle for 1 hour on 3D Systems LC-3D Mixer for first use
- Roll for 10 minutes before subsequent uses

2.5 kg cartridge for Figure 4 Modular

- Vigorously shake the bottle for 2 minutes before installing cartridge

Use the Resin Mixer to stir material in the tray for 30 seconds between print jobs.

MANUAL CLEANING INSTRUCTIONS

- Manual cleaning with 2 containers of IPA (wash and rinse)
- Clean in 'wash' IPA for 5 minutes while agitating part
- Rinse in 'clean' IPA for 5 minutes while agitating part
 - DO NOT EXCEED more than 10 minutes total exposure to IPA to preserve mechanical properties
- Manual agitation and/or a soft brush can be used to aid cleaning
- Refresh IPA when cleaning becomes ineffective

DRYING INSTRUCTIONS

- Ambient air dry > 1 hour before post cure

UV CURE TIME

- 3D Systems LC-3DPrint Box UV Post-Curing Unit or Figure 4 UV Cure Unit 350 : 90 minutes

More details can be found in the Figure 4 User Guide available at <http://infocenter.3dsystems.com>

Figure 4 Standalone: <http://infocenter.3dsystems.com/figure4standalone/node/1546>

Figure 4 Modular: <http://infocenter.3dsystems.com/figure4modular/node/1741>



www.3dsystems.com

3DS-40113B 03-20

Warranty/Disclaimer: The performance characteristics of these products may differ according to variations in printing and post processing conditions, test equipment, product application, operating conditions, or with end use. 3D Systems makes no warranties of any type, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability or fitness for a particular use.

© 2020 by 3D Systems, Inc. All rights reserved. Specifications subject to change without notice. 3D Systems, the 3D Systems logo and Figure 4 are registered trademarks of 3D Systems, Inc.



Anexo IV



Figure 4® Rigid White

Production Rigid

Opaque rigid white production-grade plastic for same-day parts. This biocompatible-capable material provides a smooth surface finish, long-term environmental stability, and long-lasting, clean white color.

Figure 4

SAVE ON TOOLING COSTS AND TIME WITH DIRECT PRODUCTION PLASTIC PARTS

Figure 4® Rigid White is a production-grade opaque white material that provides long-term environmental stability and long-lasting, clean white color. This material is recommended for use in medical, consumer goods, and industrial manufacturing applications, and other applications where a smooth surface finish, long-term indoor and outdoor stability, and biocompatible capability are needed.

This resin exhibits thermoplastic behavior with necking at break, making it ideal for snap-fit applications. It also features 65°C heat deflection temperature and high elongation at break. Fast print speeds and simplified post-processing enable exceptional throughput.

HANDLING AND POST-PROCESSING GUIDELINES

Proper mixing, cleaning, drying, and curing are required for this material. Post-processing information is available at the end of this document.

Note: All listed properties are based on using the documented post-processing method. Deviations from this method may yield different results.

More details are available in the Figure 4 User Guide:

<http://infocenter.3dsystems.com>

Figure 4 Standalone:

<http://infocenter.3dsystems.com/figure4standalone/node/1546>

Figure 4 Modular:

<http://infocenter.3dsystems.com/figure4modular/node/1741>

Note: Not all products and materials are available in all countries — please consult your local sales representative for availability.

APPLICATIONS

- Handles and fixtures for medical applications that require biocompatibility
- Electronics enclosures and small components or parts for devices
- Motor housings, covers, guards, snap-fit parts, jigs, fixtures and other functional prototypes and low volume production plastic parts

BENEFITS

- Long-term indoor and outdoor environmental (UV and humidity) stability of mechanical properties and performance
- Clean, long-lasting, opaque white color
- Fast throughput to finished part; no secondary thermal cure required
- Excellent surface quality, accuracy, and repeatability

FEATURES

- Thermoplastic behavior with necking at break
- 65°C heat deflection temperature
- 20% elongation at break
- Flexural modulus of 2200MPa
- Biocompatible-capable
- UL94 HB flammability
- Print speeds up to 47 mm/hr at 50 micron layer thickness
- Enables printing of larger, thicker geometries in Premium Plus mode





Figure 4 Rigid White

MATERIAL PROPERTIES

The full suite of mechanical properties are given per ASTM and ISO standards where applicable. In addition, properties such as flammability, dielectric properties, and 24 hour water absorption are provided. This allows for better understanding of the material capability to aid in design decisions for the material. All parts are conditioned per ASTM recommended standards for a minimum of 40 hours at 23 °C, 50% RH.

Solid material properties reported were printed along the vertical axis (ZY-orientation). Figure 4 material properties are relatively uniform across print orientations, as detailed in the following section on Isotropic Properties. Because of this, parts do not need to be oriented in a particular direction to exhibit these properties.

| LIQUID MATERIAL | | | | | | |
|--|---|--|--------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|
| MEASUREMENT | CONDITION/METHOD | METRIC | | ENGLISH | | |
| Viscosity | Brookfield Viscometer @ 25 °C (77 °F) | 270 cps | | 653 lb/ft-hr | | |
| Color | | White | | | | |
| Liquid Density | Kruss K11 Force Tensiometer @ 25 °C (77 °F) | 1.09 g/cm ³ | | 0.036 lb/in ³ | | |
| Default Print Layer Thickness (Standard Mode) | | 50 µm | | 0.002 in | | |
| Speed - Standard Mode | | 47 mm/hr | | 1.85 in/hr | | |
| Speed - Draft Mode | | 54 mm/hr | | 2.13 in/hr | | |
| Package Volume | | 1 kg bottle - Figure 4 Standalone 2.5 kg cartridge - Figure 4 Modular 9 kg container - Figure 4 Production | | | | |
| SOLID MATERIAL | | | | | | |
| METRIC | ASTM METHOD | METRIC | ENGLISH | ISO METHOD | METRIC | ENGLISH |
| PHYSICAL | | | | PHYSICAL | | |
| Solid Density | ASTM D792 | 1.16 g/cm ³ | 0.042 lb/in ³ | ISO 1183 | 1.16 g/cm ³ | 0.042 lb/in ³ |
| 24 Hour Water Absorption | ASTM D570 | 1.88% | 1.88% | ISO 62 | 1.88% | 1.88% |
| MECHANICAL | | | | MECHANICAL | | |
| Tensile Strength Ultimate | ASTM D638 | 57 MPa | 8200 psi | ISO 527 -1/2 | 58 MPa | 8500 psi |
| Tensile Strength at Yield | ASTM D638 | 57 MPa | 8200 psi | ISO 527 -1/2 | 58 MPa | 8500 psi |
| Tensile Modulus | ASTM D638 | 2100 MPa | 300 ksi | ISO 527 -1/2 | 2600 MPa | 370 ksi |
| Elongation at Break | ASTM D638 | 20 % | 20 % | ISO 527 -1/2 | 17.2 % | 17.2 % |
| Elongation at Yield | ASTM D638 | 4.5 % | 4.5 % | ISO 527 -1/2 | 4.2 % | 4.2 % |
| Flexural Strength | ASTM D790 | 84 MPa | 12200 psi | ISO 178 | 90 MPa | 13000 psi |
| Flexural Modulus | ASTM D790 | 2200 MPa | 320 ksi | ISO 178 | 2600 MPa | 371 ksi |
| Izod Notched Impact | ASTM D256 | 21 J/m | 0.4 ft-lb/in | ISO 180-A | 3.1 J/m ² | 0.0015 ft-lb/in ² |
| Izod Unnotched Impact | ASTM D4812 | 160 J/m | 3 ft-lb/in | ISO 180-U | | |
| Shore Hardness | ASTM D2240 | 81D | 81D | ISO 7619 | 81D | 81D |
| THERMAL | | | | THERMAL | | |
| Tg (DMA, E'') | ASTM E1640 | 64 °C | 148 °F | ISO 6721-1/11 | 64 °C | 148 °F |
| HDT @ 0.455 MPa/66 PSI | ASTM D648 | 65 °C | 149 °F | ISO 75- 1/2 B | 60 °C | 143 °F |
| HDT @ 1.82 MPa/264 PSI | ASTM D648 | 55 °C | 131 °F | ISO 75-1/2 A | 54 °C | 129 °F |
| CTE -20 to 50 °C | ASTM E831 | 82 ppm/°C | 46 ppm/°F | ISO 11359-2 | 82 ppm/°K | 46 ppm/°F |
| CTE 75 to 180 °C | ASTM E831 | 146 ppm/°C | 81 ppm/°F | ISO 11359-2 | 146 ppm/°K | 81 ppm/°F |
| UL Flammability | UL94 | HB | HB | | | |
| ELECTRICAL | | | | ELECTRICAL | | |
| Dielectric Strength (kV/mm) @ 3.0 mm thickness | ASTM D149 | 15.1 | | | | |
| Dielectric Constant @ 1 MHz | ASTM D150 | 3.21 | | | | |
| Dissipation Factor @ 1 MHz | ASTM D150 | 0.019 | | | | |
| Volume Resistivity (ohm-cm) | ASTM D257 | 6.8 X 10 ¹⁵ | | | | |

Figure 4 Rigid White

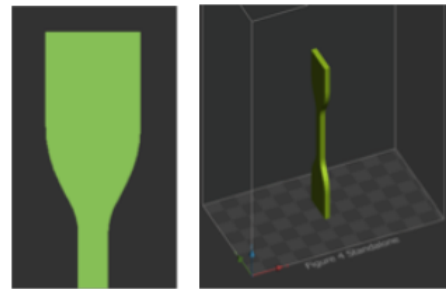


ISOTROPIC PROPERTIES

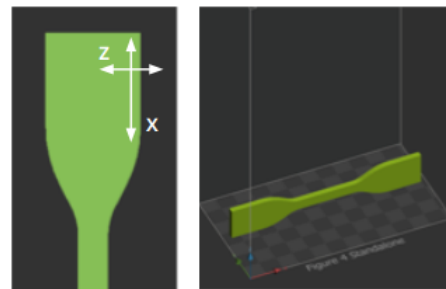
Figure 4 technology prints parts that are isotropic in mechanical properties meaning the parts printed along either the XYZ axis will give similar results.

Parts do not need to be oriented to get the highest mechanical properties, further improving the degree of freedom for part orientation for mechanical properties.

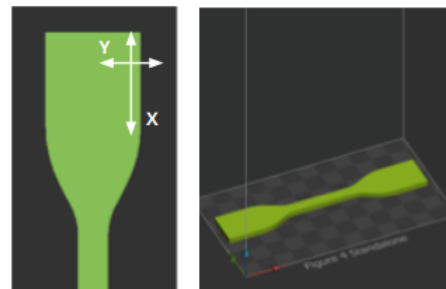
| SOLID MATERIAL | | | | | |
|---------------------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|
| METRIC | METHOD | METRIC | | | |
| MECHANICAL | | | | | |
| | | ZY | XZ | XY | Z45 |
| Tensile Strength Ultimate | ASTM D638 Type IV | 57 MPa | 62 MPa | 61 MPa | 59 MPa |
| Tensile Strength at Yield | ASTM D638 Type IV | 57 MPa | 62 MPa | 61 MPa | 59 MPa |
| Tensile Modulus | ASTM D638 Type IV | 2100 MPa | 2100 MPa | 2100 MPa | 2100 MPa |
| Elongation at Break | ASTM D638 Type IV | 20 % | 20 % | 22 % | 23 % |
| Elongation at Yield | ASTM D638 Type IV | 4.5 % | 4.5 % | 4.8 % | 4.2 % |
| Flexural Strength | ASTM D790 | 84 MPa | 93 MPa | 88 MPa | 82 MPa |
| Flexural Modulus | ASTM D790 | 2200 MPa | 2400 MPa | 2200 MPa | 2100 MPa |
| Izod Notched Impact | ASTM D256 | 21 J/m | 26 J/m | 24 J/m | 24 J/m |
| Shore Hardness | ASTM D2240 | 81D | 81D | 81D | 81D |



ZY - orientation



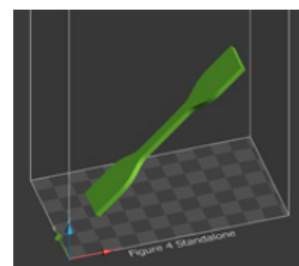
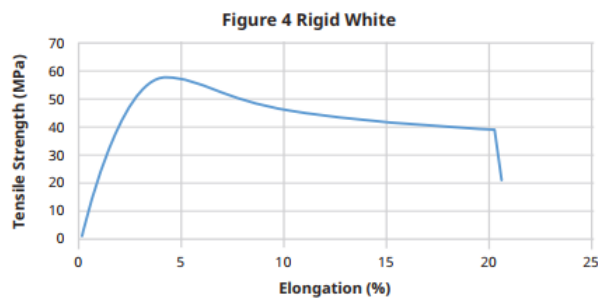
XZ - orientation



XY - orientation

STRESS-STRAIN CURVE

Figure 4 Rigid White exhibits thermoplastic behavior with a long plastic deformation ductile necking before fracturing which gives better snap and clip performance.



Z45-Degree - orientation

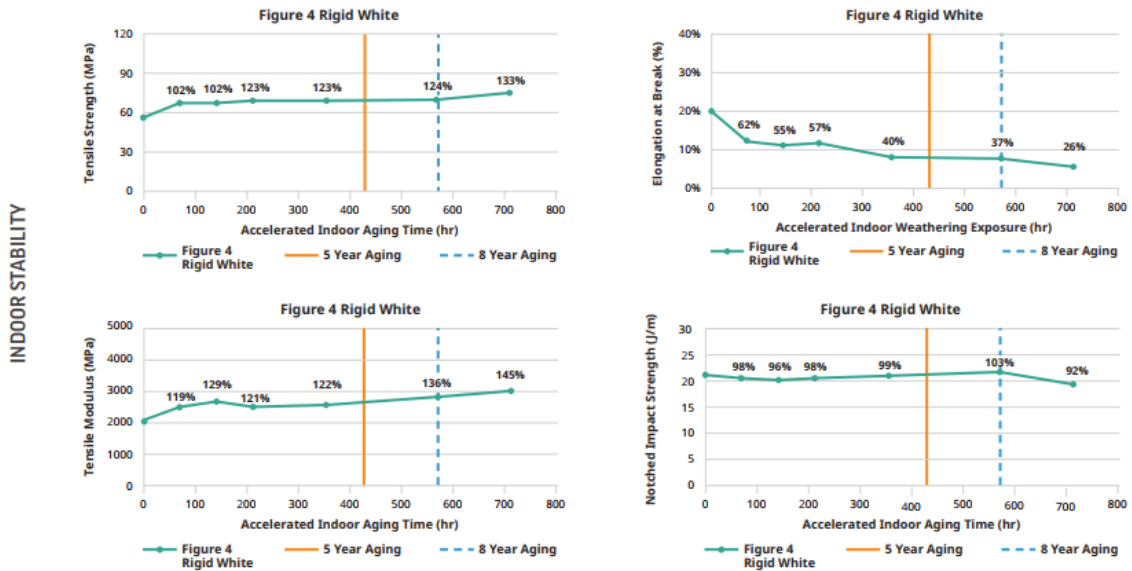
Figure 4 Rigid White



LONG-TERM ENVIRONMENTAL STABILITY

Figure 4 Rigid White is engineered to give long term environmental UV and humidity stability. This means the material is tested for the ability to retain a high percent of the initial mechanical properties over a given period of time. This provides real design conditions to consider for the application or part. **Actual data value is on Y-axis, and data points are % of initial value.**

INDOOR STABILITY: Tested per ASTM D4329 standard method.



OUTDOOR STABILITY: Tested per ASTM G154 standard method.

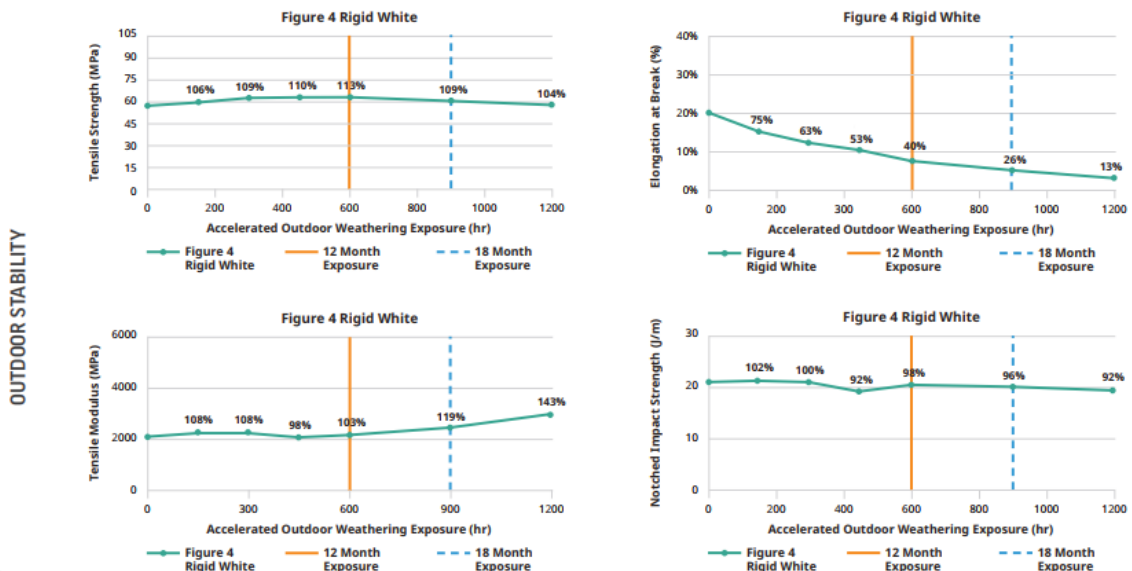




Figure 4 Rigid White

AUTOMOTIVE FLUID COMPATIBILITY

The compatibility of a material with hydrocarbons and cleaning chemicals is critical to part application. Figure 4 Rigid White parts were tested for sealed and surface contact compatibility per USCAR2 test conditions. The fluids below were tested in two different ways per the specs.

- Immerse for 7 days, then take mechanical property data for comparison.
- Immerse for 30 minutes, remove, and take mechanical property data for comparison in 7 days

Data reflects the measured value of properties over that period of time.

| AUTOMOTIVE FLUIDS | | |
|-------------------------------|--|--------------|
| FLUID | SPECIFICATION | TEST TEMP °C |
| Gasoline | ISO 1817, liquid C | 23 ± 5 |
| Diesel Fuel | 905 ISO 1817, Oil No. 3 + 10% p-xylene* | 23 ± 5 |
| Engine Oil | ISO 1817, Oil No. 2 | 50 ± 3 |
| Ethanol | 85% Ethanol + 15% ISO 1817 liquid C* | 23 ± 5 |
| Power Steering Fluid | ISO 1917, Oil No. 3 | 50 ± 3 |
| Automotive Transmission Fluid | Dexron VI (North American specific material) | 50 ± 3 |
| Engine Coolant | 50% ethylene glycol + 50% distilled water* | 50 ± 3 |
| Brake Fluid | SAE RM66xx (Use latest available fluid for xx) | 50 ± 3 |
| Diesel Exhaust Fluid (DEF) | API certified per ISO 22241 | 23 ± 5 |

*Solutions are determined as percent by volume

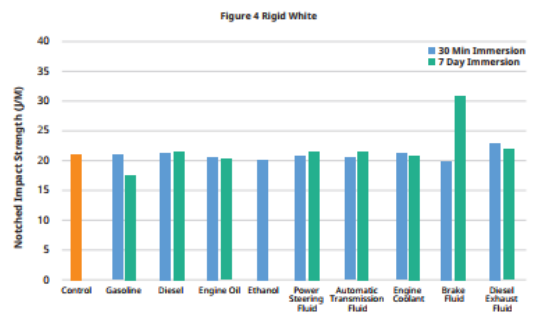
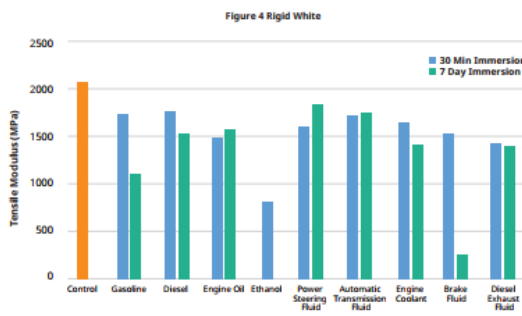
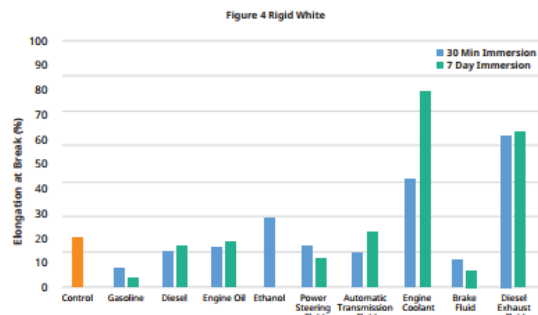
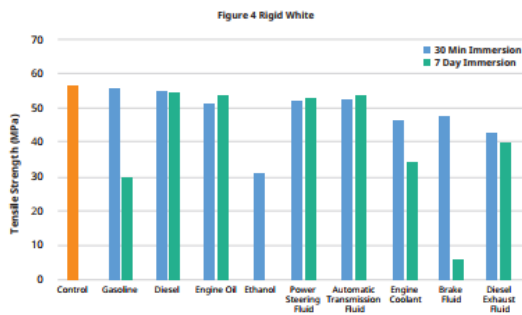




Figure 4 Rigid White

CHEMICAL COMPATIBILITY

The compatibility of a material with cleaning chemicals is critical to part application. Figure 4 Rigid White parts were tested for sealed and surface contact compatibility per ASTM D543 test conditions. The fluids below were tested in two different ways per the specs.

- Immerse for 7 days, then take mechanical property data for comparison.
- Immerse for 30 minutes, remove, and take mechanical property data for comparison in 7 days

Data reflects the measured value of properties over that period of time.

*Denotes materials did not go thru 7-day soak conditioning.

| CHEMICAL COMPATIBILITY |
|--|
| 6.3.3 Acetone |
| 6.3.12 Detergent Solution, Heavy Duty |
| 6.3.23 Hydrochloric Acid (10%) |
| 6.3.38 Sodium Carbonate Solution (20%) |
| 6.3.44 Sodium Hypochlorite Solution |
| 6.3.46 Sulfuric Acid (30%) |
| 6.3.42 Sodium Hydroxide Soln (10%) |
| 6.3.15 Distilled Water |

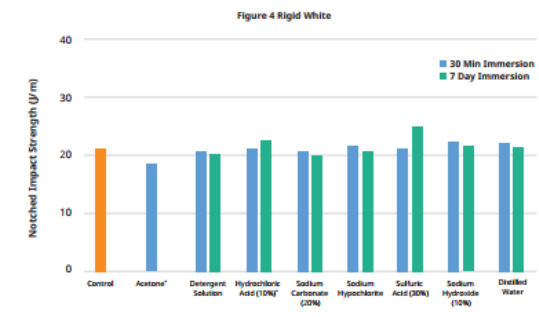
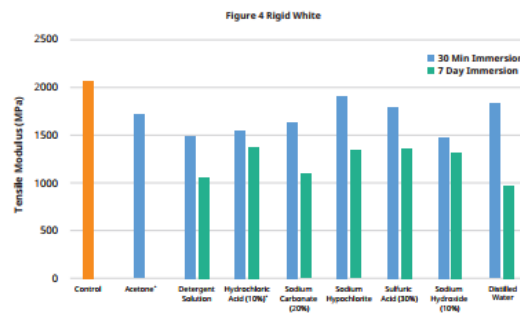
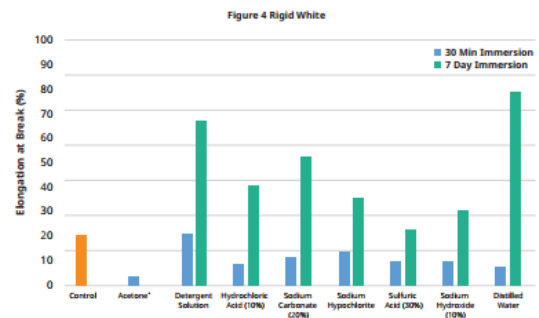
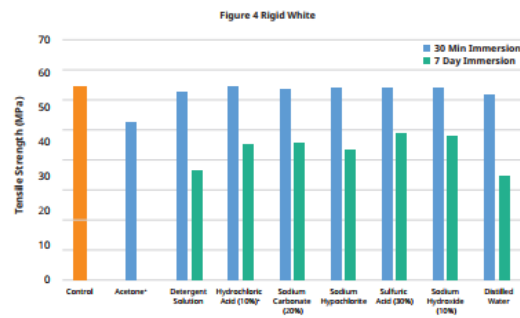


Figure 4 Rigid White



BIOCOMPATIBILITY STATEMENT

Figure 4® Rigid White test coupons printed and processed according to the post processing instructions below were provided to an external biological testing laboratory for evaluation in accordance with *ISO 10993-5, Biological evaluation of medical devices - Part 5: Tests for in vitro cytotoxicity*, and *ISO 10993-10, Biological evaluation of medical devices - Part 10: Tests for irritation and skin sensitization (GPMT)*. The test results indicate that Figure 4® Rigid White has passed the requirements for biocompatibility according to the above tests.

It is the responsibility of each customer to determine that its use of Figure 4® Rigid White material is safe, lawful and technically suitable to the customer's intended applications. Customers should conduct their own testing to ensure that this is the case. Because of possible changes in the law and in regulations, as well as possible changes in these materials, 3D Systems cannot guarantee that the status of these materials will remain unchanged or that it will qualify as biocompatible in any particular use. Therefore, 3D Systems recommends that customers continuing to use these materials verify their status on a periodic basis.



Figure 4 Rigid White



POST-PROCESSING INSTRUCTIONS REQUIRED TO PASS ISO 10993-5 AND ISO 10993-10

MIXING INSTRUCTIONS

This material has a pigment that settles very slowly over time before printing. For best results mix material in the bottle:

1 kg bottle for Figure 4 Standalone

- Roll bottle for 1 hour on 3D Systems LC-3D Mixer for first use
- Roll for 10 minutes before subsequent uses

2.5 kg cartridge for Figure 4 Modular

- Vigorously shake the bottle for 2 minutes before installing cartridge

Use the Resin Mixer to stir material in the tray for 30 seconds between print jobs.

MANUAL CLEANING INSTRUCTIONS

- Manual cleaning with 2 containers of IPA (wash and rinse)
- Clean in 'wash' IPA for 5 minutes while agitating part
- Rinse in 'clean' IPA for 5 minutes while agitating part
 - DO NOT EXCEED more than 10 minutes total exposure to IPA to preserve mechanical properties
- Manual agitation and/or a soft brush can be used to aid cleaning
- Refresh IPA when cleaning becomes ineffective

DRYING INSTRUCTIONS

- Ambient air dry > 1 hour before post cure

UV CURE TIME

- 90 minutes in 3D Systems LC-3DPrint Box UV Post-Curing Unit or Figure 4 UV Cure Unit 350

More details are available in the Figure 4 User Guide <http://infocenter.3dsystems.com>

Figure 4 Standalone: <http://infocenter.3dsystems.com/figure4standalone/node/1546>

Figure 4 Modular: <http://infocenter.3dsystems.com/figure4modular/node/1741>



www.3dsystems.com

3DS-40117A 02-21

Warranty/Disclaimer: The performance characteristics of these products may differ according to variations in printing and post processing conditions, test equipment, product application, operating conditions, or with end use. 3D Systems makes no warranties of any type, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability or fitness for a particular use.

© 2021 by 3D Systems, Inc. All rights reserved. Specifications subject to change without notice. 3D Systems, the 3D Systems logo and Figure 4 are registered trademarks of 3D Systems, Inc.




Apêndices


Solidworks simulation ortotese report

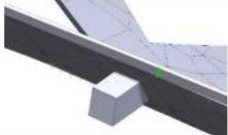
PRO-BLK10 - ortotese_2mm5_v4.SLDPRTE - 1.75mm - 20N

Material Properties

| Model Reference | Properties | Components |
|---|--|---|
|  | Name: ProBlack10 (2) Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 6.3e+07 N/m ² Tensile strength: 6.3e+07 N/m ² Elastic modulus: 2.32001e+09 N/m ² Poisson's ratio: 0.3 Mass density: 1,160 kg/m ³ | SolidBody 41(Cut-Extrude13)(ortotese_2mm5_v4) |
| Curve Data:N/A | | |

Loads and Fixtures

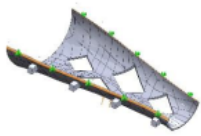
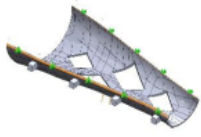
| Fixture name | Fixture Image | Fixture Details | | |
|-------------------------|--|--|----------|------------------|
| Fixed-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry | | |
| Resultant Forces | | | | |
| Components | X | Y | Z | Resultant |
| Reaction force(N) | 2.1428 | -19.1047 | 4.00547 | 19.6374 |
| Reaction Moment(N.m) | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Load name | Load Image | Load Details |
|-----------|---|---|
| Force-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Apply normal force Value: 20 N |

Mesh information

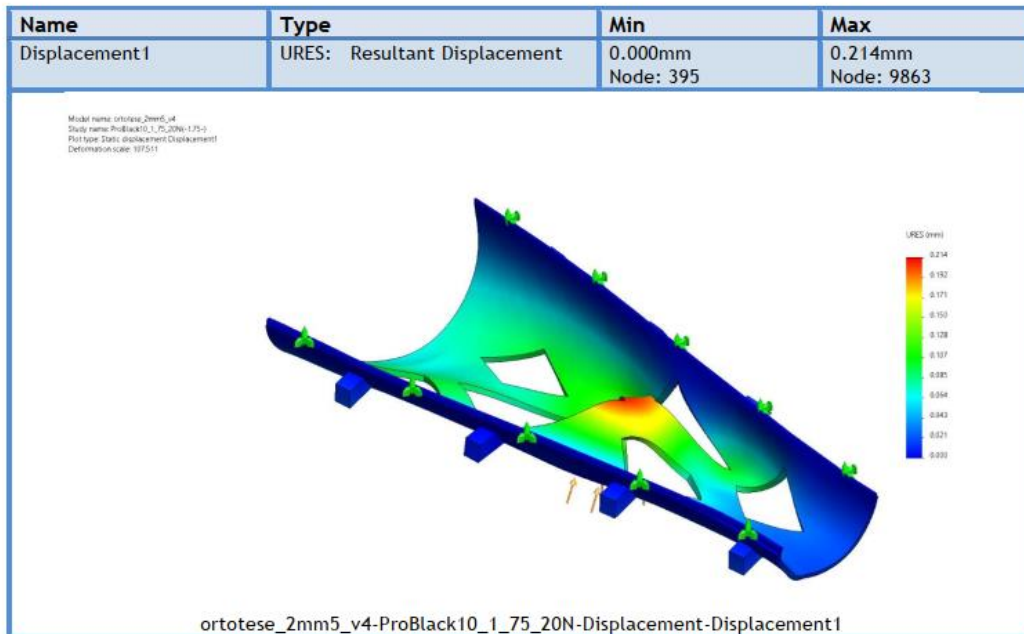
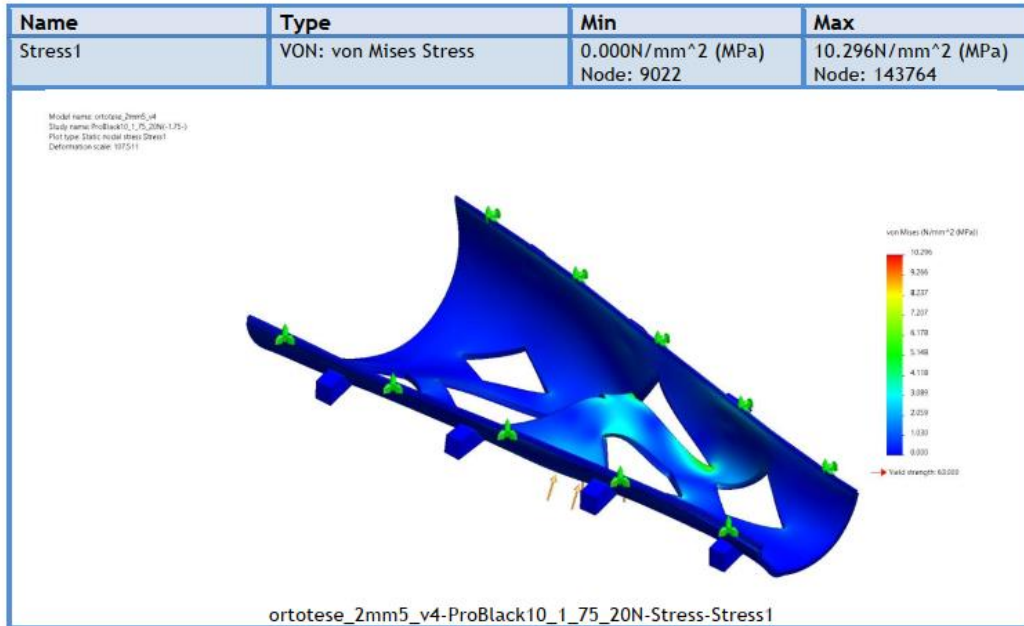
| | |
|--|----------------------|
| Mesh type | Solid Mesh |
| Mesher Used: | Curvature-based mesh |
| Jacobian points for High quality mesh | 16 Points |
| Maximum element size | 1 mm |
| Minimum element size | 0.2 mm |
| Mesh Quality | High |

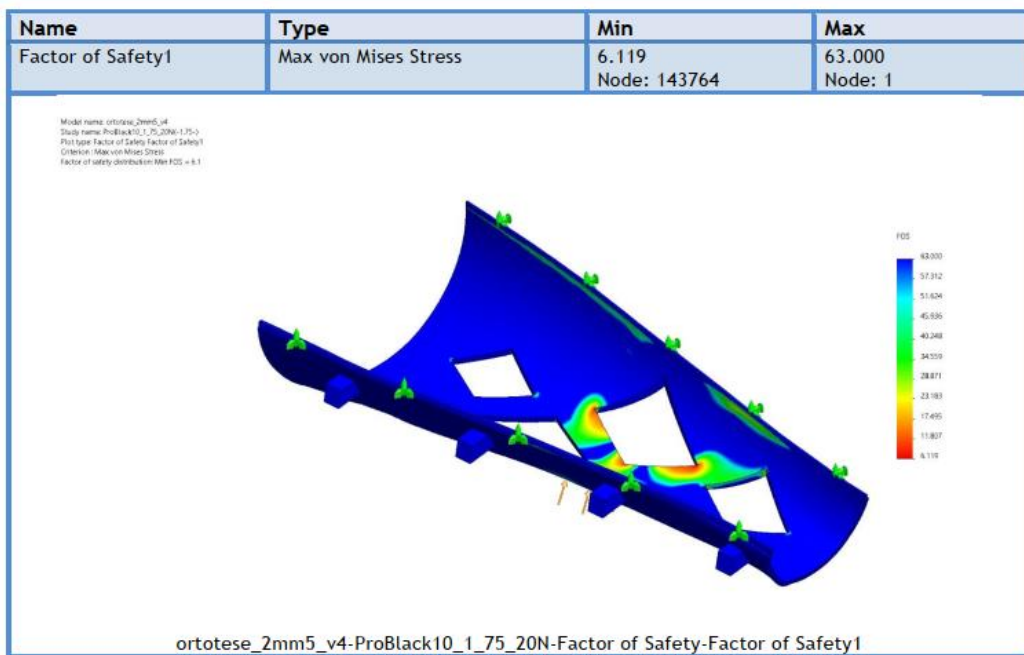
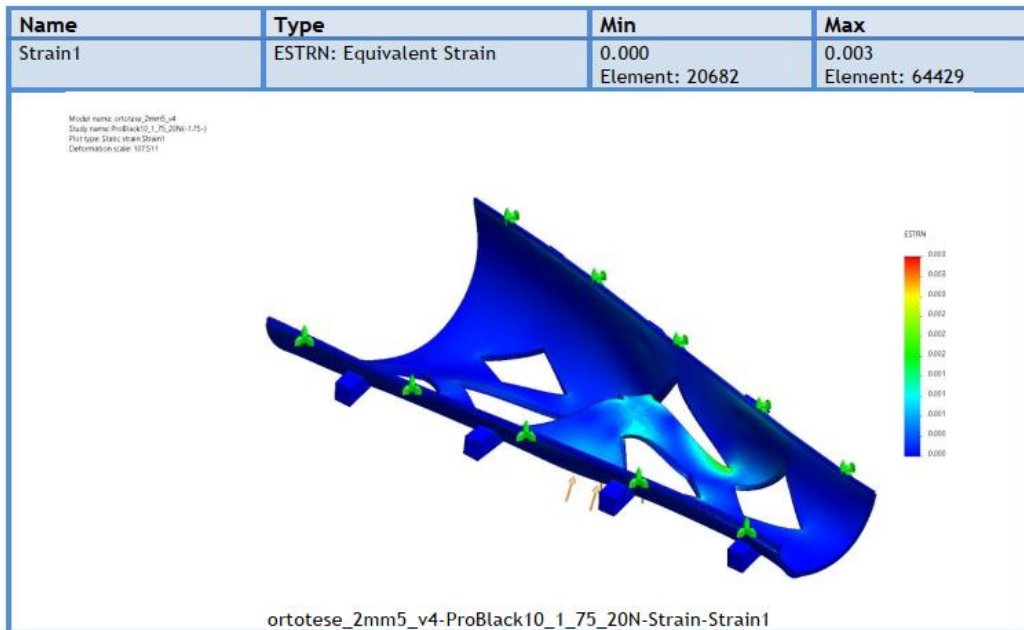
Sensor Details

| Sensor name | Location | Sensor Details |
|---------------|--|---|
| Displacement1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Displacement Component :URES: Resultant Displacement Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |
| Stress1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Stress Component :VON: von Mises Stress Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |



Study Results

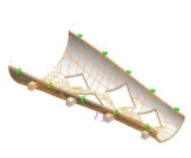




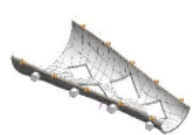
Solidworks Simulation ortotese report

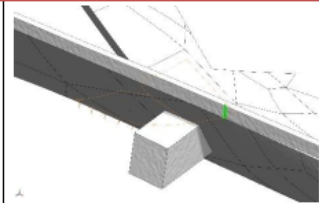
PRO-BLK 10 - Ortotese_2mm5_v4.SLDPRT - 1.75mm - 100N

Material Properties

| Model Reference | Properties | Components |
|---|---|---|
|  | Name: ProBlack10 Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 6.3e+07 N/m ² Tensile strength: 6.30004e+07 N/m ² Elastic modulus: 2.32001e+09 N/m ² Poisson's ratio: 0.3 Mass density: 1,160 kg/m ³ | SolidBody 41(Cut-Extrude13)(ortotese_2mm5_v4) |
| Curve Data:N/A | | |

Loads and Fixtures

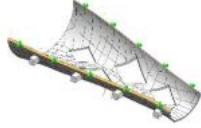
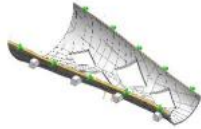
| Fixture name | Fixture Image | Fixture Details | | |
|-------------------------|--|---|----------|------------------|
| Fixed-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry | | |
| Resultant Forces | | | | |
| Components | X | Y | Z | Resultant |
| Reaction force(N) | 10.714 | -95.5236 | 20.0274 | 98.1868 |
| Reaction Moment(N.m) | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Load name | Load Image | Load Details |
|-----------|---|--|
| Force-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Apply normal force Value: 100 N |

Mesh information

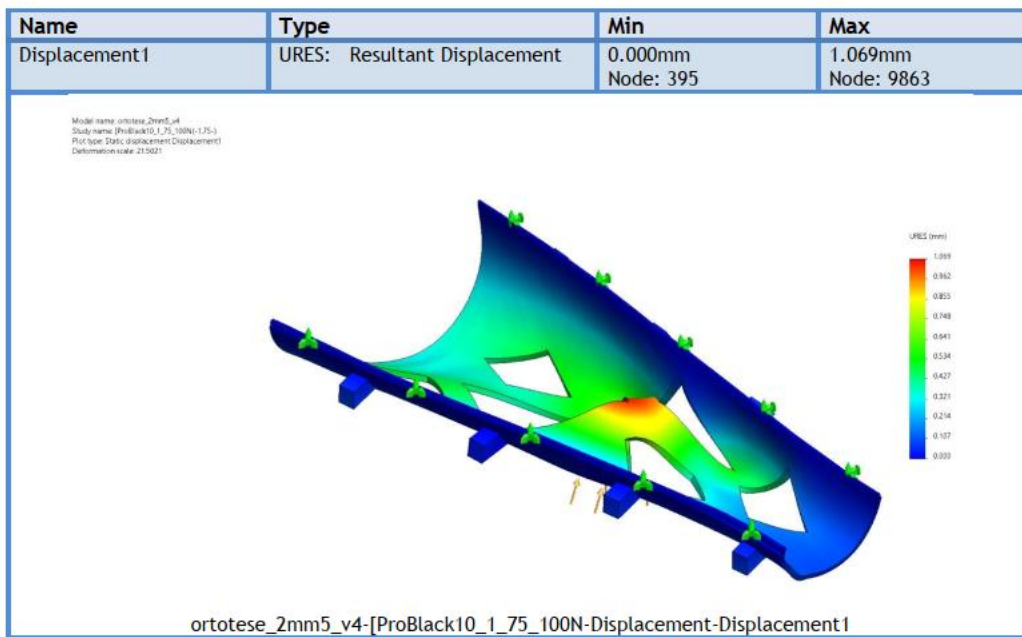
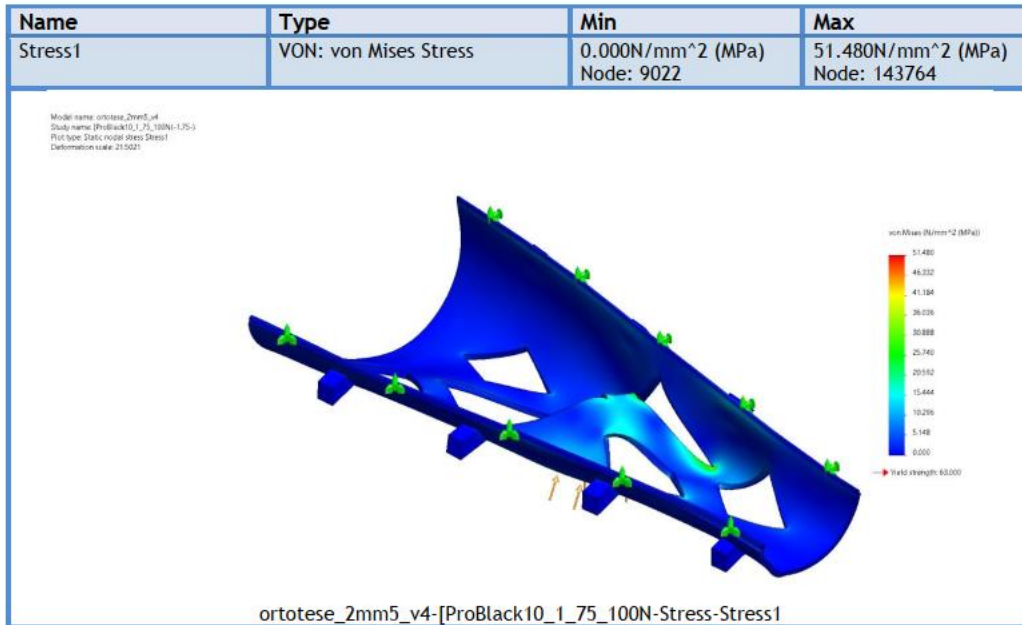
| | |
|---------------------------------------|----------------------|
| Mesh type | Solid Mesh |
| Mesher Used: | Curvature-based mesh |
| Jacobian points for High quality mesh | 16 Points |
| Maximum element size | 1 mm |
| Minimum element size | 0.2 mm |
| Mesh Quality | High |

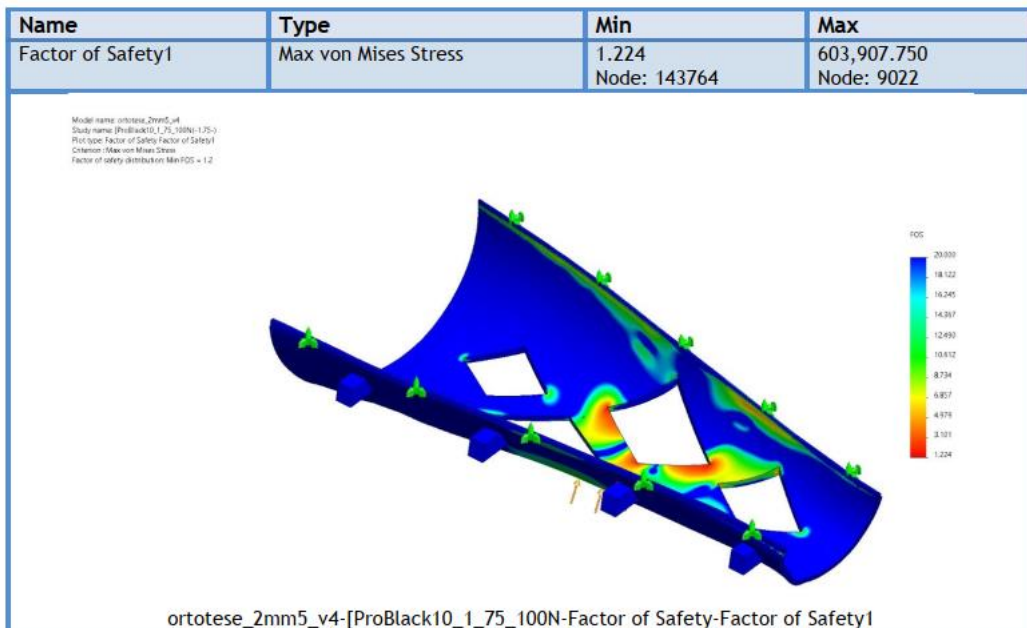
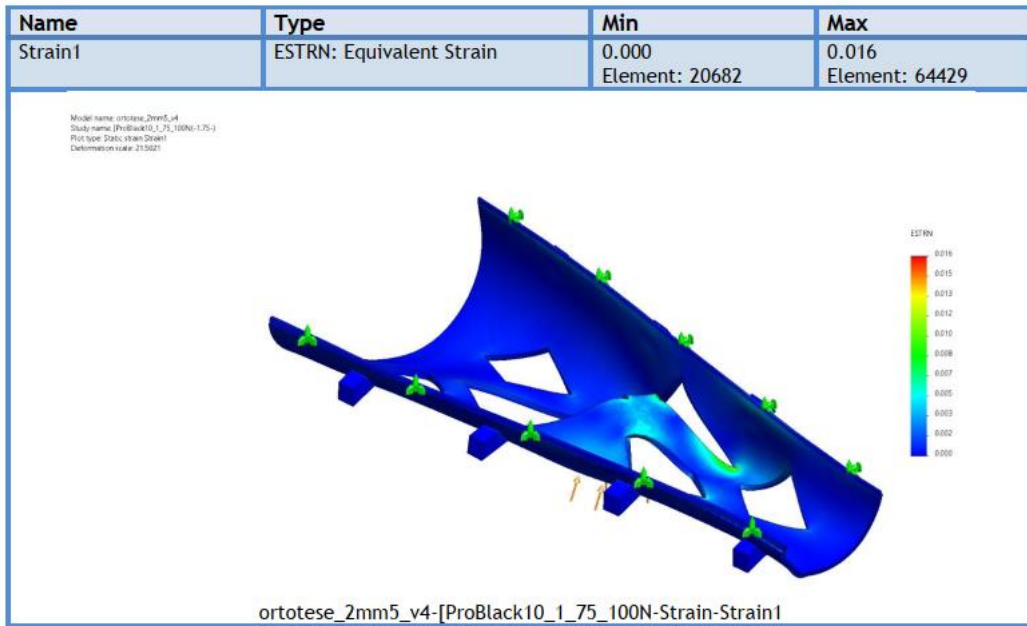
Sensor Details

| Sensor name | Location | Sensor Details |
|---------------|--|---|
| Displacement1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Displacement Component :URES: Resultant Displacement Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |
| Stress1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Stress Component :VON: von Mises Stress Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |



Study Results

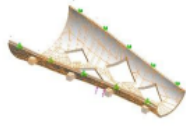




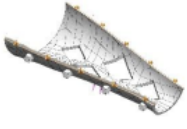
Solidworks simulation ortotese report

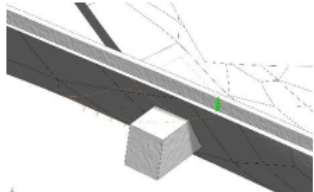
PRO-BLK 10 - ortotese_2mm5_v4.SLDPRT - 2.5mm - 20N

Material Properties

| Model Reference | Properties | Components |
|---|---|---|
|  | Name: ProBlack10 Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 6.3e+07 N/m ² Tensile strength: 6.30004e+07 N/m ² Elastic modulus: 2.32001e+09 N/m ² Poisson's ratio: 0.3 Mass density: 1,160 kg/m ³ | SolidBody 41(Cut-Extrude13)(ortotese_2mm5_v4) |
| Curve Data:N/A | | |

Loads and Fixtures

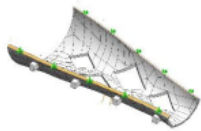
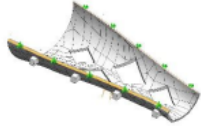
| Fixture name | Fixture Image | Fixture Details | | |
|-----------------------------|---|---|----------|------------------|
| Fixed-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry | | |
| Resultant Forces | | | | |
| Components | X | Y | Z | Resultant |
| Reaction force(N) | 2.14303 | -19.103 | 4.00774 | 19.6361 |
| Reaction Moment(N.m) | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Load name | Load Image | Load Details |
|-----------|---|---|
| Force-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Apply normal force Value: 20 N |

Mesh information

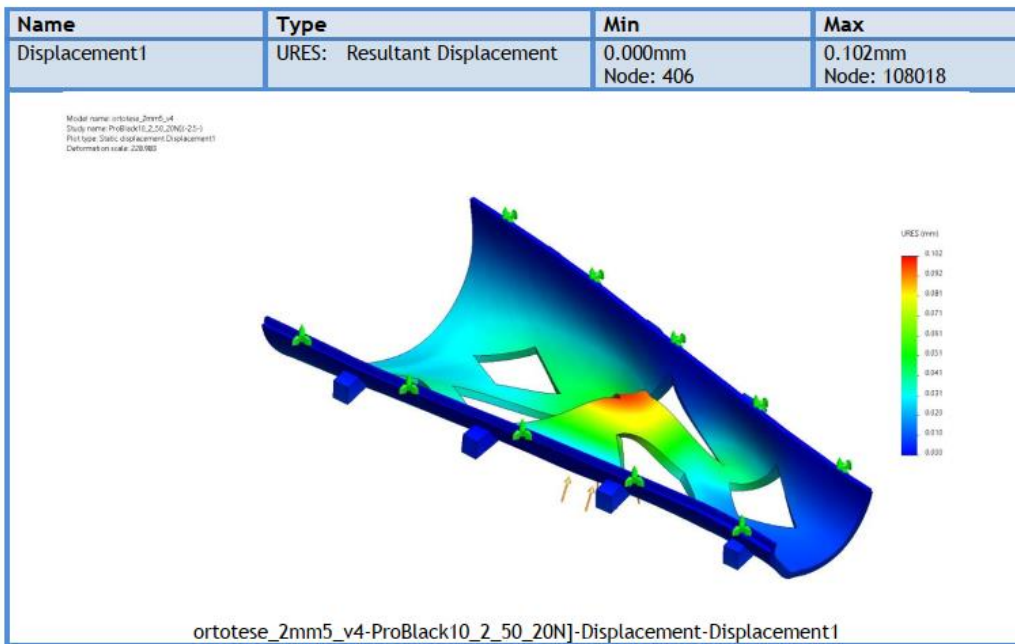
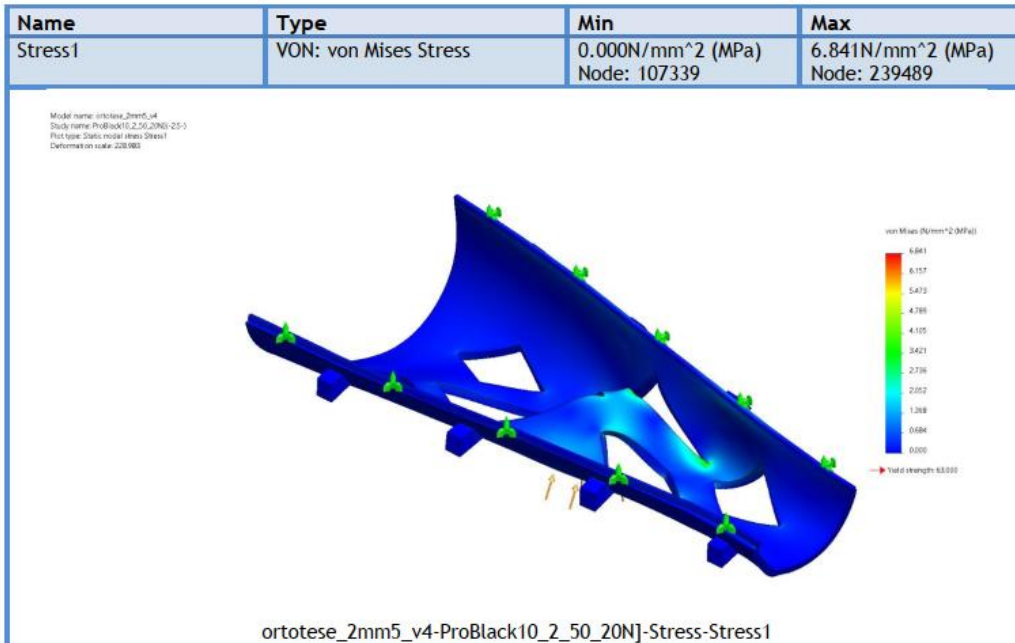
| | |
|--|----------------------|
| Mesh type | Solid Mesh |
| Mesher Used: | Curvature-based mesh |
| Jacobian points for High quality mesh | 16 Points |
| Maximum element size | 1 mm |
| Minimum element size | 0.2 mm |
| Mesh Quality | High |

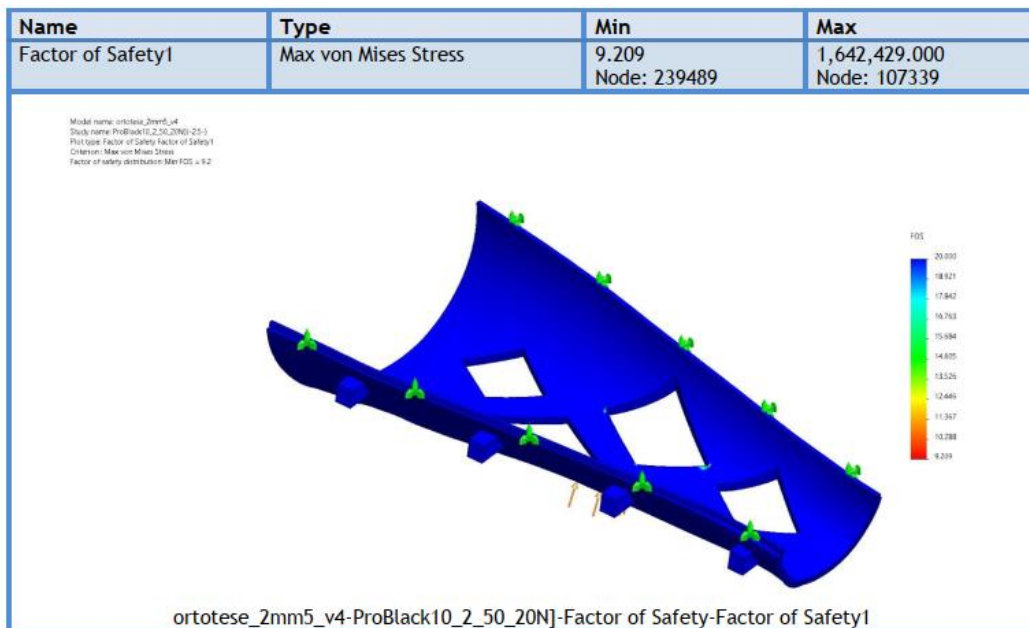
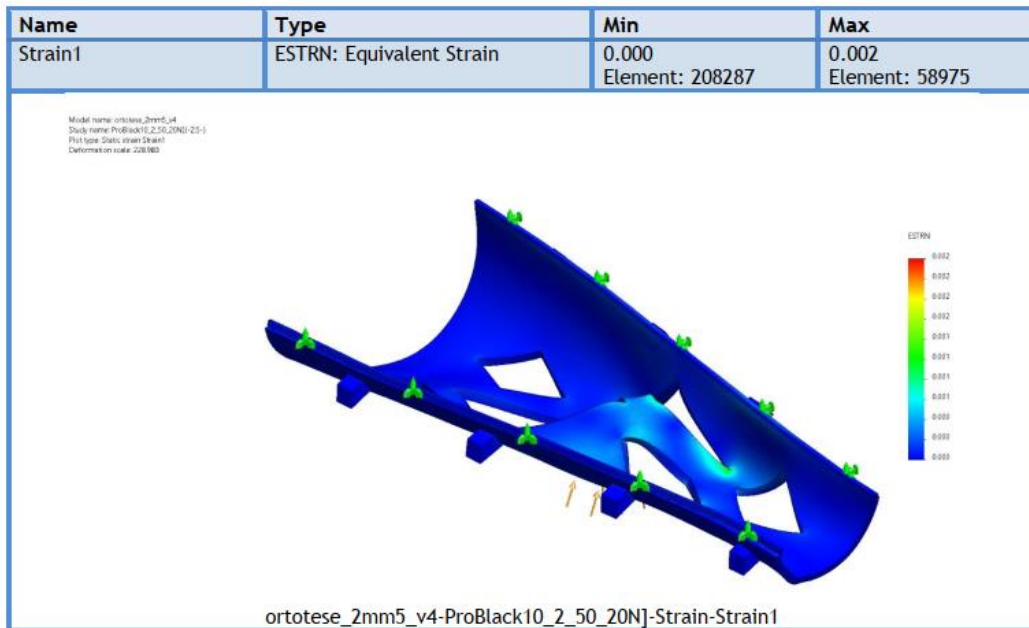
Sensor Details

| Sensor name | Location | Sensor Details |
|---------------|---|---|
| Displacement1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Displacement Component :URES: Resultant Displacement Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |
| Stress1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Stress Component :VON: von Mises Stress Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |



Study Results

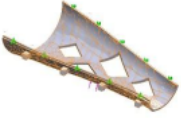





Solidworks simulation ortotese report

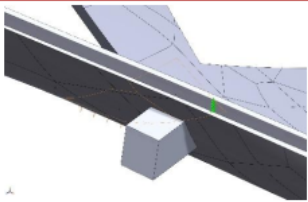
PRO-BLK 10 - ortotese_2mm5_v4.SLDPRT - 2.5mm - 100N

Material Properties

| Model Reference | Properties | Components |
|---|---|---|
|  | Name: ProBlack10 Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 6.3e+07 N/m ² Tensile strength: 6.30004e+07 N/m ² Elastic modulus: 2.32001e+09 N/m ² Poisson's ratio: 0.3 Mass density: 1,160 kg/m ³ | SolidBody 41(Cut-Extrude13)(ortotese_2mm5_v4) |
| Curve Data:N/A | | |

Loads and Fixtures

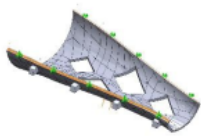
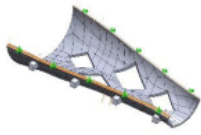
| Fixture name | Fixture Image | Fixture Details | | |
|-------------------------|---|---|----------|------------------|
| Fixed-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry | | |
| Resultant Forces | | | | |
| Components | X | Y | Z | Resultant |
| Reaction force(N) | 10.7151 | -95.5148 | 20.0385 | 98.1807 |
| Reaction Moment(N.m) | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Load name | Load Image | Load Details |
|-----------|---|--|
| Force-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Apply normal force Value: 100 N |

Mesh information

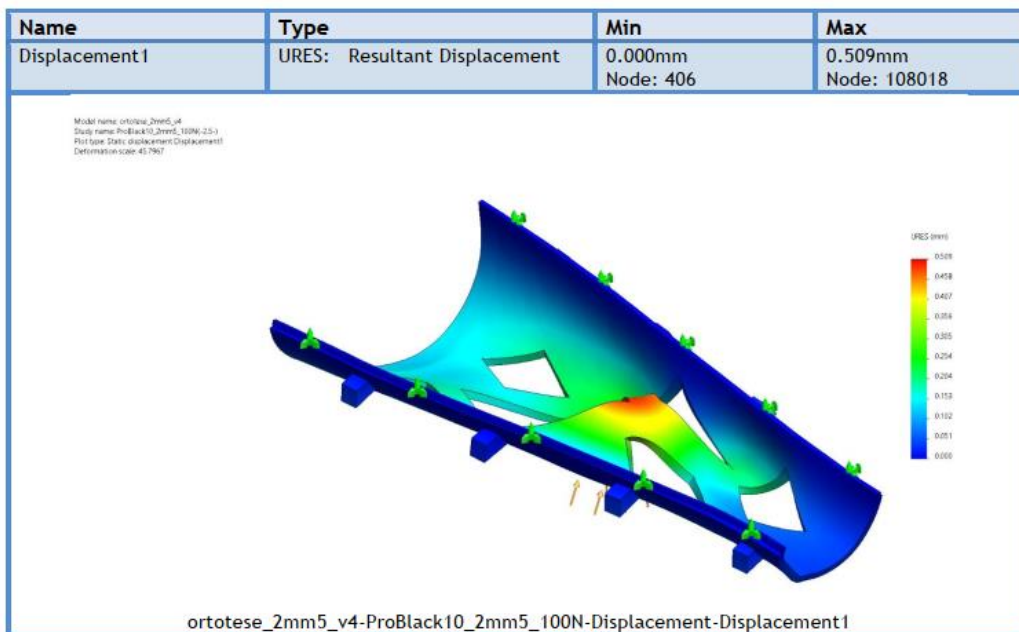
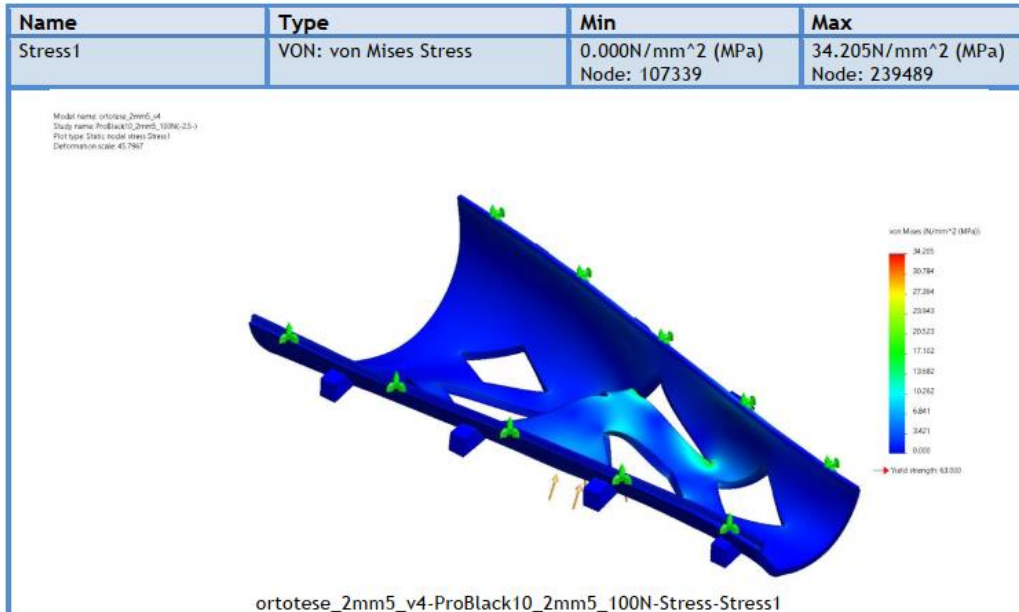
| | |
|--|----------------------|
| Mesh type | Solid Mesh |
| Mesher Used: | Curvature-based mesh |
| Jacobian points for High quality mesh | 16 Points |
| Maximum element size | 1 mm |
| Minimum element size | 0.2 mm |
| Mesh Quality | High |

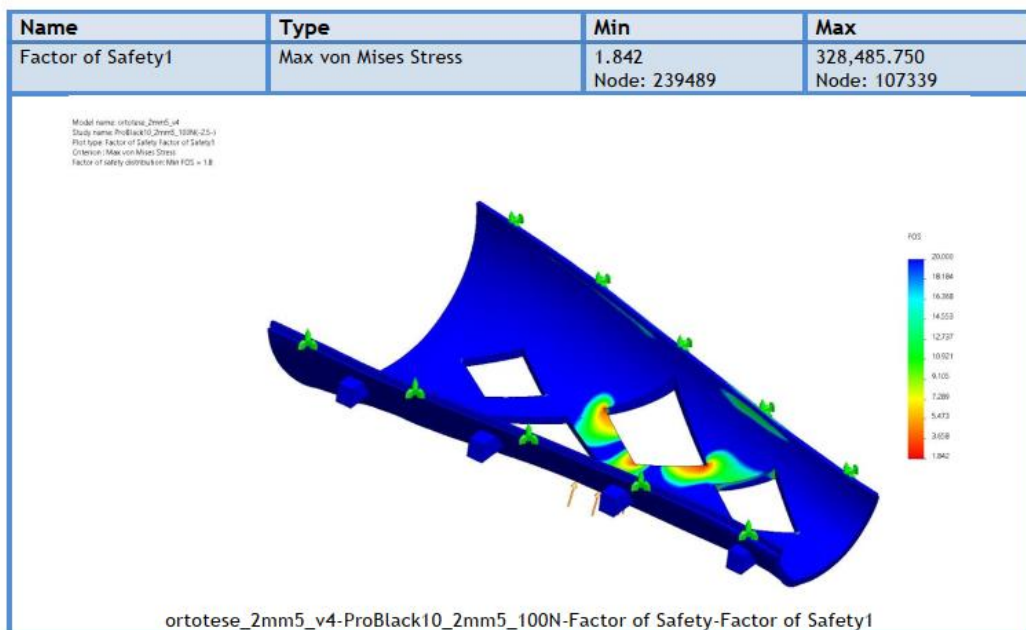
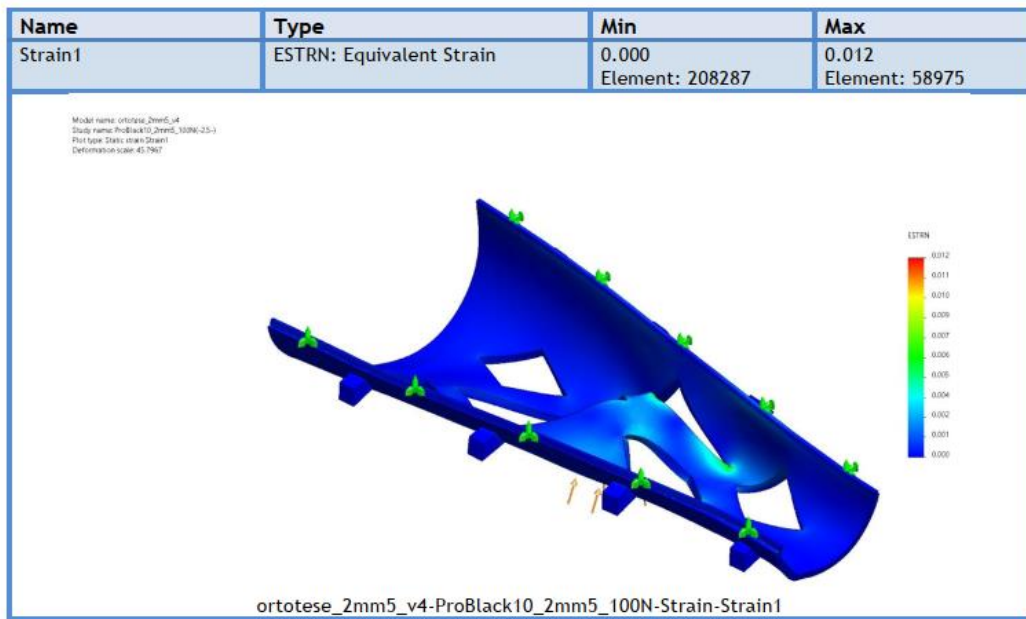
Sensor Details

| Sensor name | Location | Sensor Details |
|---------------|---|---|
| Displacement1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Displacement Component :URES: Resultant Displacement Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |
| Stress1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Stress Component :VON: von Mises Stress Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |



Study Results

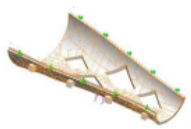




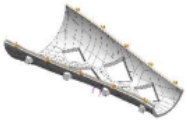
Solidworks simulation ortotese report

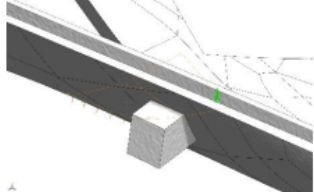
PRO-BLK 10 - ortotese_2mm5_v4.SLDPRT - 3.25mm - 20N

Material Properties

| Model Reference | Properties | Components |
|---|---|---|
|  | Name: ProBlack10 Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 6.3e+07 N/m ² Tensile strength: 6.30004e+07 N/m ² Elastic modulus: 2.32001e+09 N/m ² Poisson's ratio: 0.3 Mass density: 1,160 kg/m ³ | SolidBody 41(Cut-Extrude13)(ortotese_2mm5_v4) |
| Curve Data:N/A | | |

Loads and Fixtures

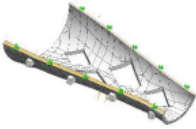
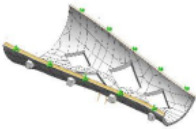
| Fixture name | Fixture Image | Fixture Details | | |
|-------------------------|---|---|----------|------------------|
| Fixed-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry | | |
| Resultant Forces | | | | |
| Components | X | Y | Z | Resultant |
| Reaction force(N) | 2.14321 | -19.1038 | 4.01337 | 19.6381 |
| Reaction Moment(N.m) | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Load name | Load Image | Load Details |
|-----------|---|---|
| Force-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Apply normal force Value: 20 N |

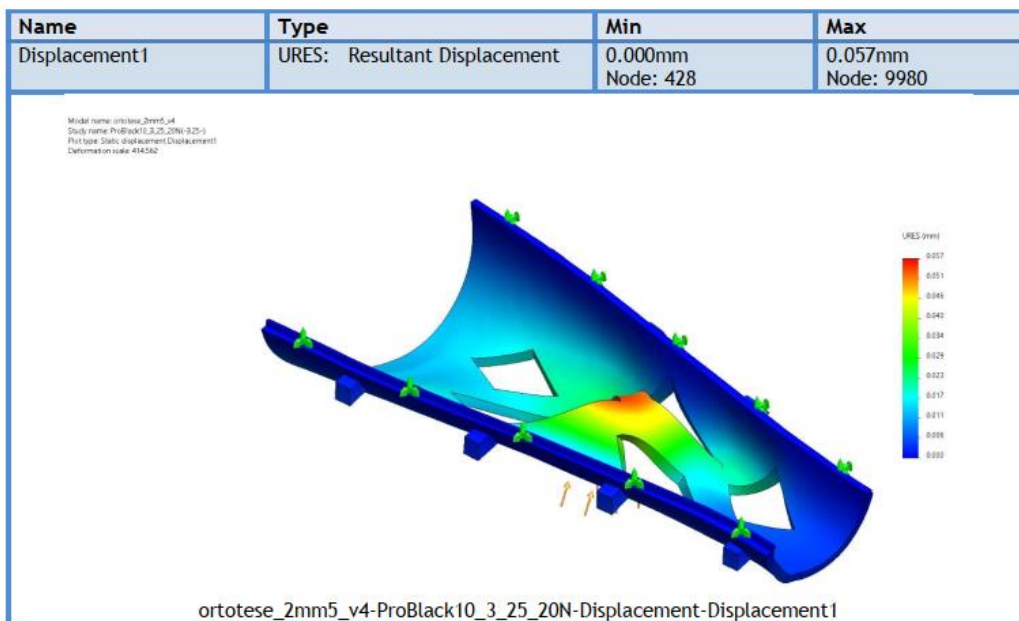
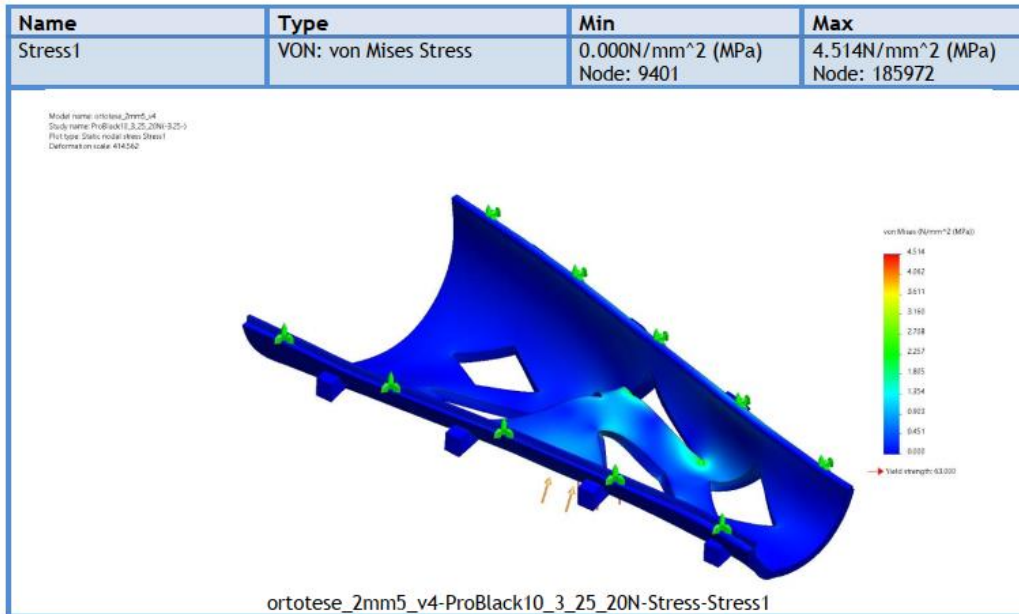
Mesh information

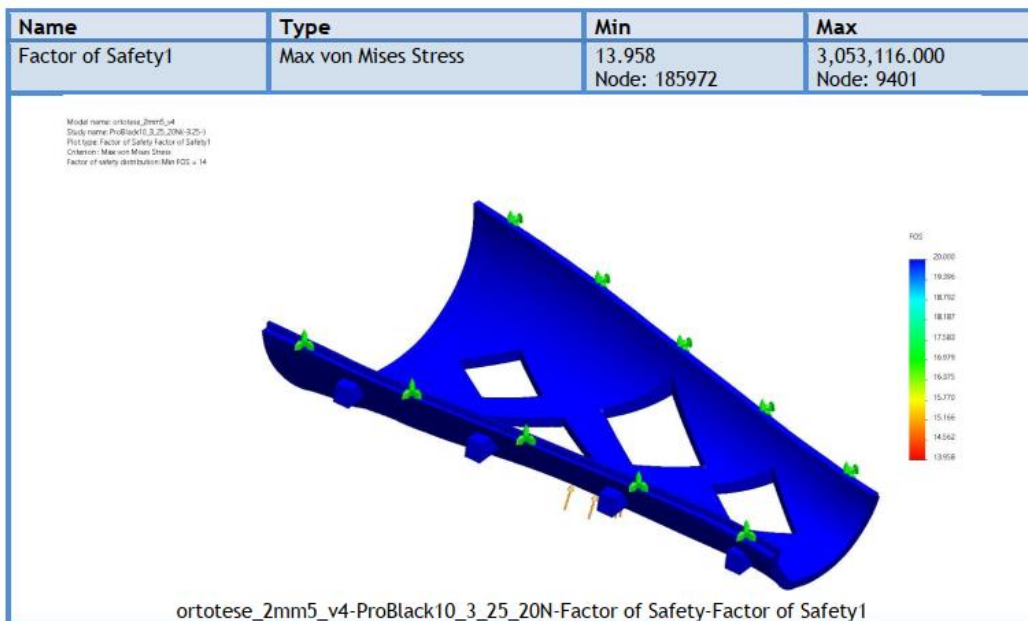
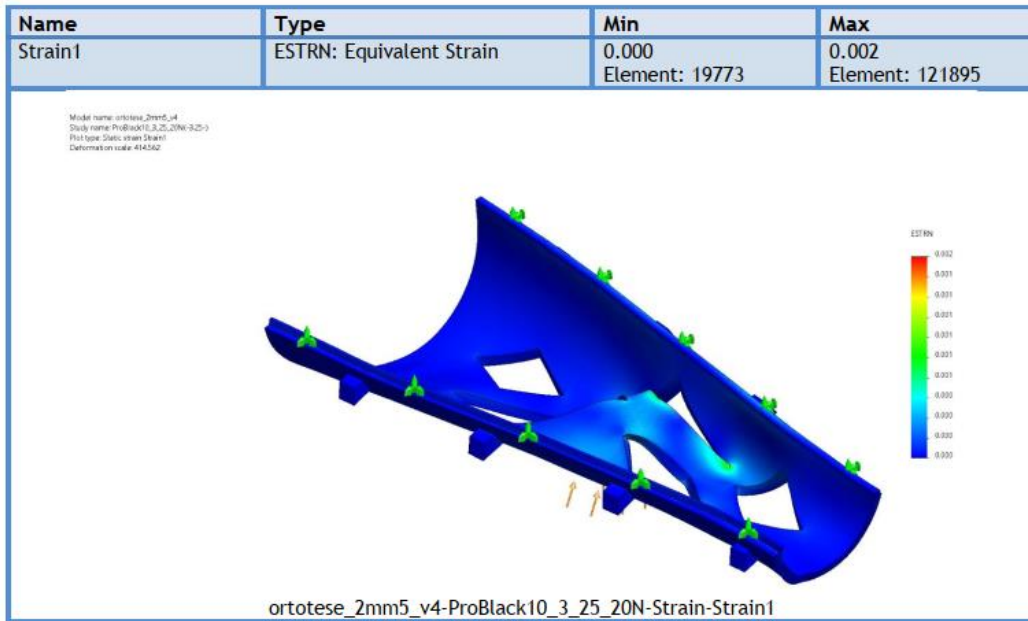
| | |
|--|----------------------|
| Mesh type | Solid Mesh |
| Mesher Used: | Curvature-based mesh |
| Jacobian points for High quality mesh | 16 Points |
| Maximum element size | 1 mm |
| Minimum element size | 0.2 mm |
| Mesh Quality | High |

Sensor Details

| Sensor name | Location | Sensor Details |
|---------------|---|---|
| Displacement1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Displacement Component :URES: Resultant Displacement Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |
| Stress1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Stress Component :VON: von Mises Stress Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |

Study Results

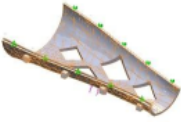





Solidworks simulation ortotese report

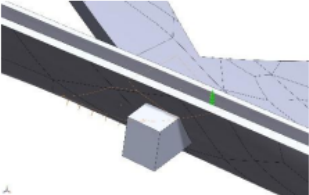
PRO-BLK 10 - ortotese_2mm5_v4.SLDPRT - 3.25mm - 100N

Material Properties

| Model Reference | Properties | Components |
|---|---|---|
|  | Name: ProBlack10 Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 6.3e+07 N/m ² Tensile strength: 6.30004e+07 N/m ² Elastic modulus: 2.32001e+09 N/m ² Poisson's ratio: 0.3 Mass density: 1,160 kg/m ³ | SolidBody 41(Cut-Extrude13)(ortotese_2mm5_v4) |
| Curve Data:N/A | | |

Loads and Fixtures

| Fixture name | Fixture Image | Fixture Details | | |
|-------------------------|---|---|----------|------------------|
| Fixed-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry | | |
| Resultant Forces | | | | |
| Components | X | Y | Z | Resultant |
| Reaction force(N) | 10.716 | -95.5188 | 20.0667 | 98.1904 |
| Reaction Moment(N.m) | 0 | 0 | 0 | 0 |

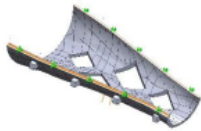
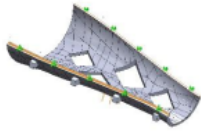
| Load name | Load Image | Load Details |
|-----------|---|--|
| Force-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Apply normal force Value: 100 N |



Mesh information

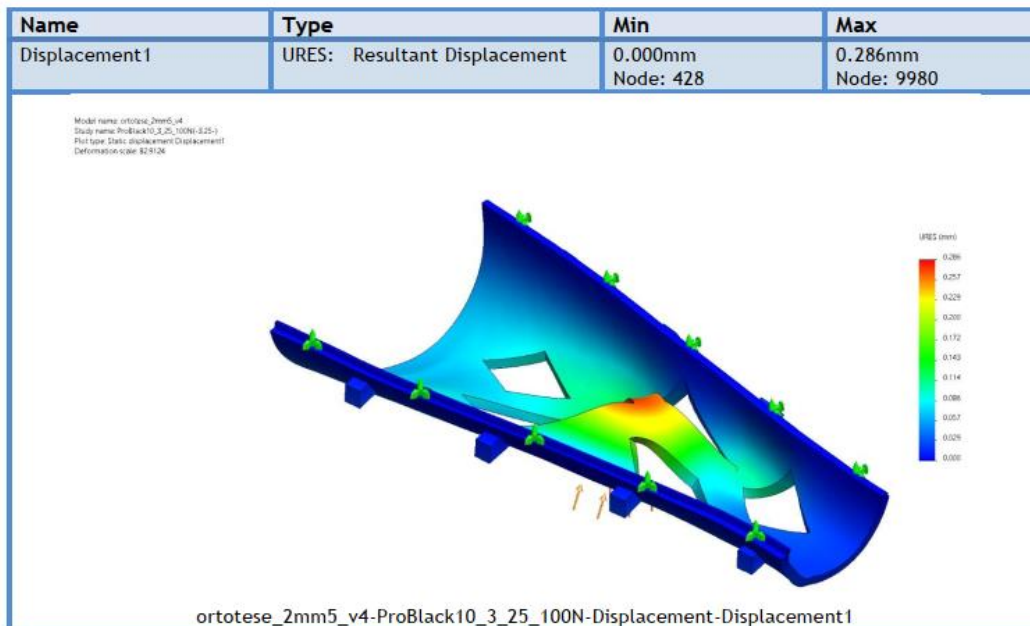
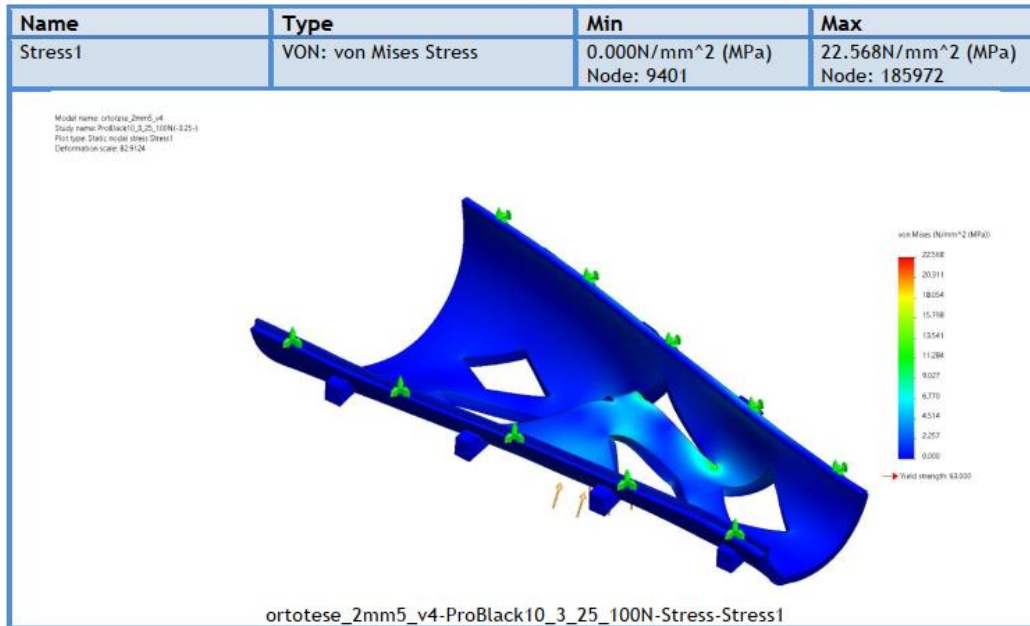
| | |
|--|----------------------|
| Mesh type | Solid Mesh |
| Mesher Used: | Curvature-based mesh |
| Jacobian points for High quality mesh | 16 Points |
| Maximum element size | 1 mm |
| Minimum element size | 0.2 mm |
| Mesh Quality | High |

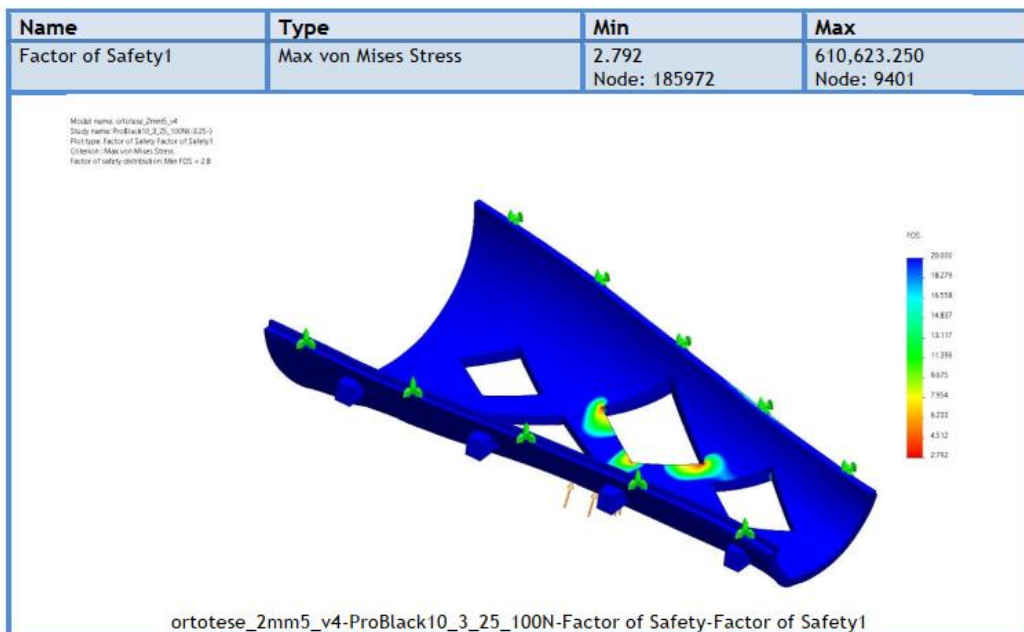
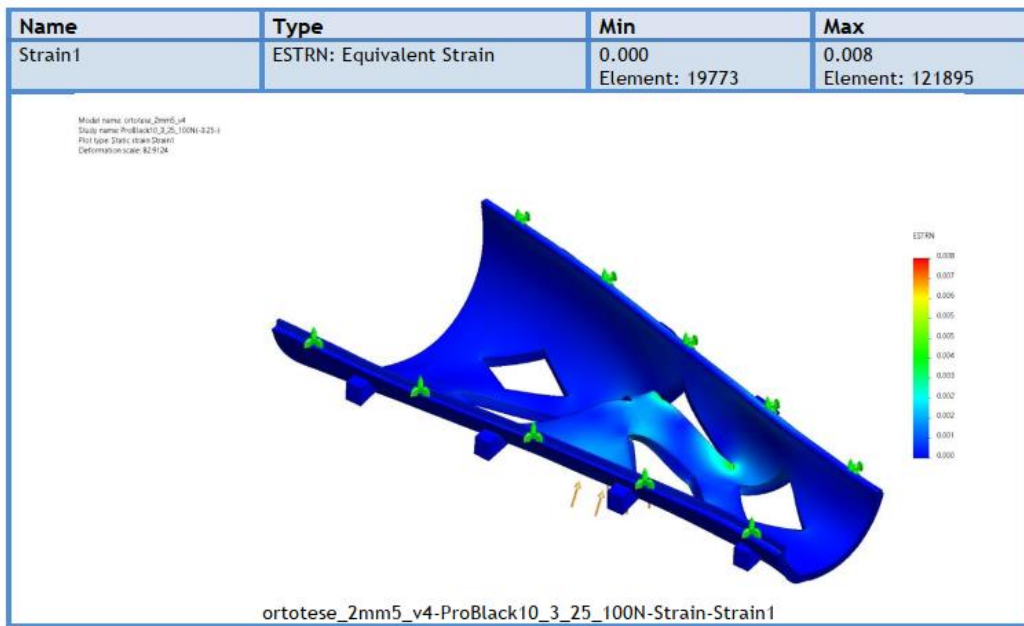
Sensor Details

| Sensor name | Location | Sensor Details |
|---------------|---|---|
| Displacement1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Displacement Component :URES: Resultant Displacement Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |
| Stress1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Stress Component :VON: von Mises Stress Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |



Study Results

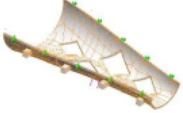




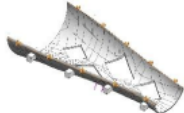
Solidworks simulation ortotese report

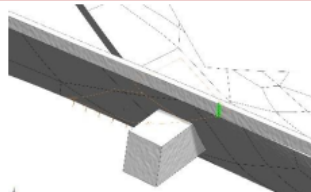
Rigid White - ortotese_2mm5_v4.SLDPRT - 1.75mm - 20N

Material Properties

| Model Reference | Properties | Components |
|---|---|---|
|  | Name: RigidWhite Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 5.70003e+07 N/m ² Tensile strength: 5.70003e+07 N/m ² Elastic modulus: 2.10001e+09 N/m ² Poisson's ratio: 0.3 Mass density: 1,160 kg/m ³ | SolidBody 41(Cut-Extrude13)(ortotese_2mm5_v4) |
| Curve Data:N/A | | |

Loads and Fixtures

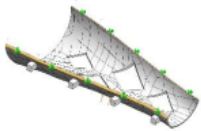
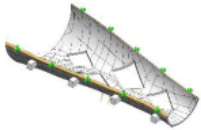
| Fixture name | Fixture Image | Fixture Details | | |
|-------------------------|---|---|----------|------------------|
| Fixed-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry | | |
| Resultant Forces | | | | |
| Components | X | Y | Z | Resultant |
| Reaction force(N) | 2.1428 | -19.1047 | 4.00547 | 19.6374 |
| Reaction Moment(N.m) | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Load name | Load Image | Load Details |
|-----------|---|---|
| Force-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Apply normal force Value: 20 N |

Mesh information

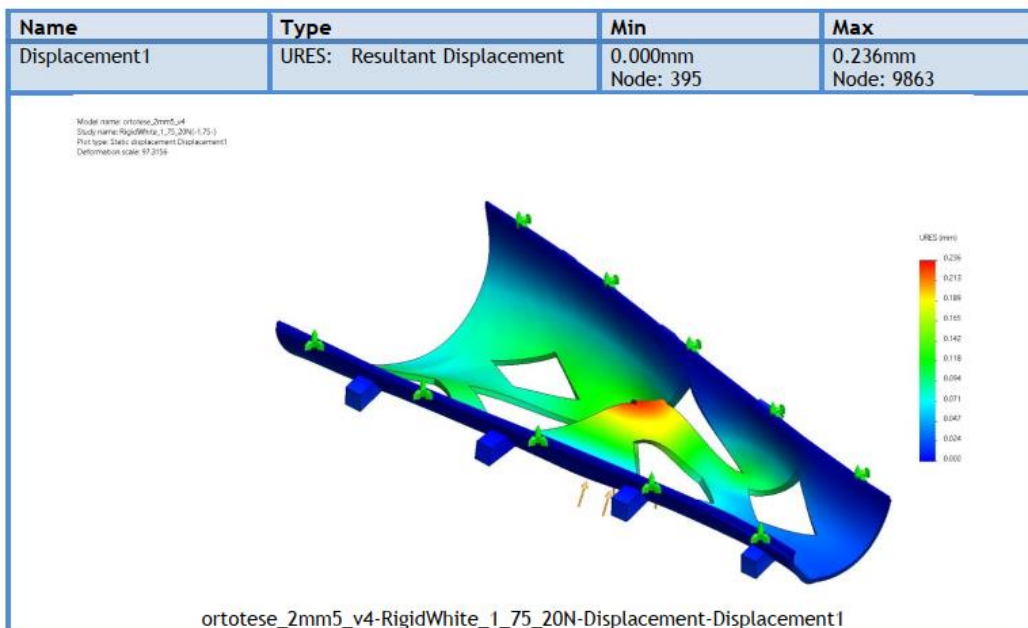
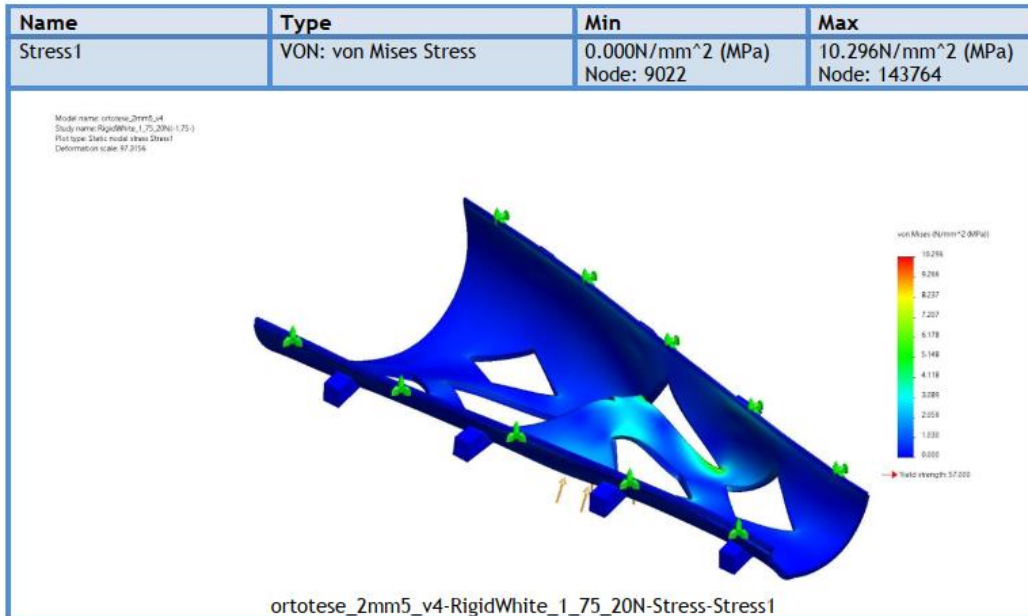
| | |
|--|----------------------|
| Mesh type | Solid Mesh |
| Mesher Used: | Curvature-based mesh |
| Jacobian points for High quality mesh | 16 Points |
| Maximum element size | 1 mm |
| Minimum element size | 0.2 mm |
| Mesh Quality | High |

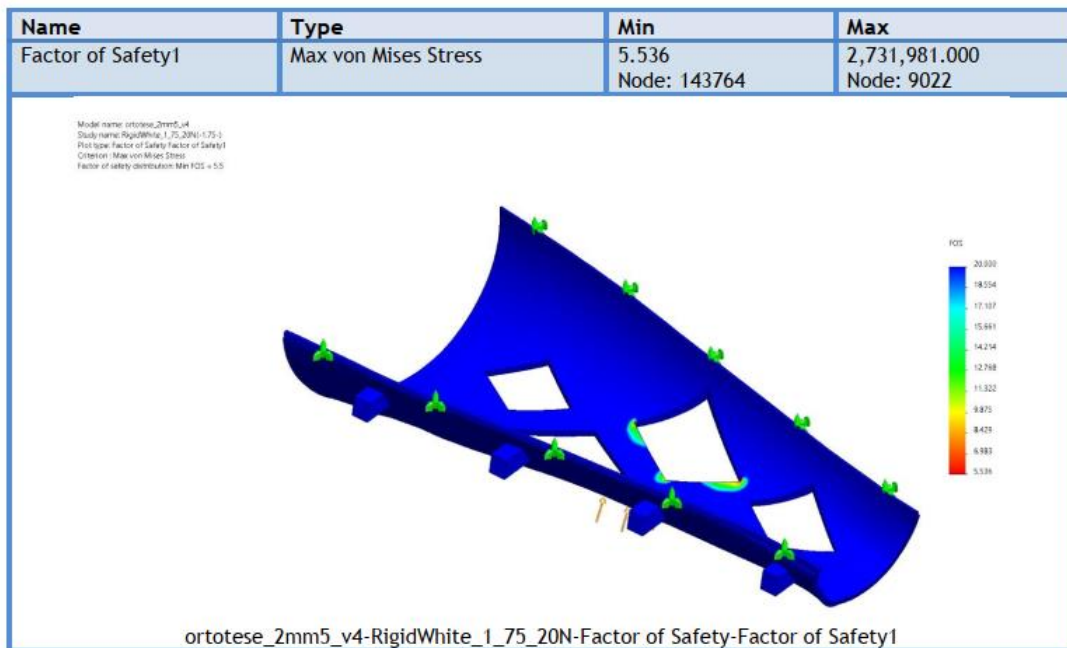
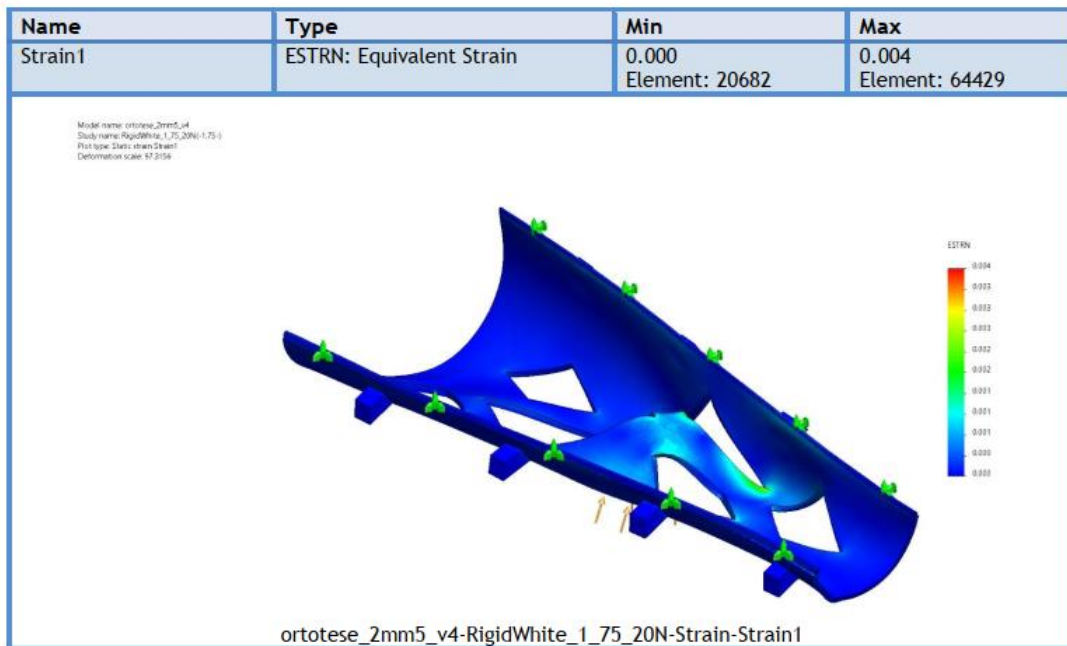
Sensor Details

| Sensor name | Location | Sensor Details |
|---------------|---|---|
| Displacement1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Displacement Component :URES: Resultant Displacement Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |
| Stress1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Stress Component :VON: von Mises Stress Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |



Study Results

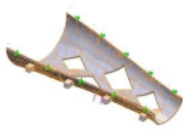




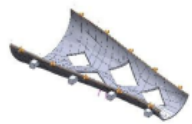
Solidworks simulation ortotese report

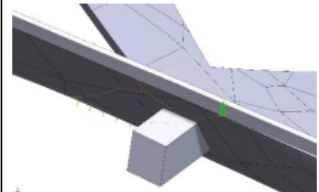
Rigid white - ortotese_2mm5_v4.SLDPRT - 1.75mm - 100N

Material Properties

| Model Reference | Properties | Components |
|---|---|---|
|  | Name: RigidWhite Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 5.70003e+07 N/m ² Tensile strength: 5.70003e+07 N/m ² Elastic modulus: 2.10001e+09 N/m ² Poisson's ratio: 0.3 Mass density: 1,160 kg/m ³ | SolidBody 41(Cut-Extrude13)(ortotese_2mm5_v4) |
| Curve Data:N/A | | |

Loads and Fixtures

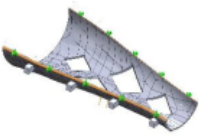
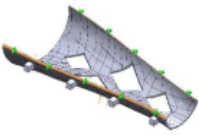
| Fixture name | Fixture Image | Fixture Details | | |
|-------------------------|---|---|----------|------------------|
| Fixed-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry | | |
| Resultant Forces | | | | |
| Components | X | Y | Z | Resultant |
| Reaction force(N) | 10.714 | -95.5236 | 20.0274 | 98.1868 |
| Reaction Moment(N.m) | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Load name | Load Image | Load Details |
|-----------|---|--|
| Force-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Apply normal force Value: 100 N |

Mesh information

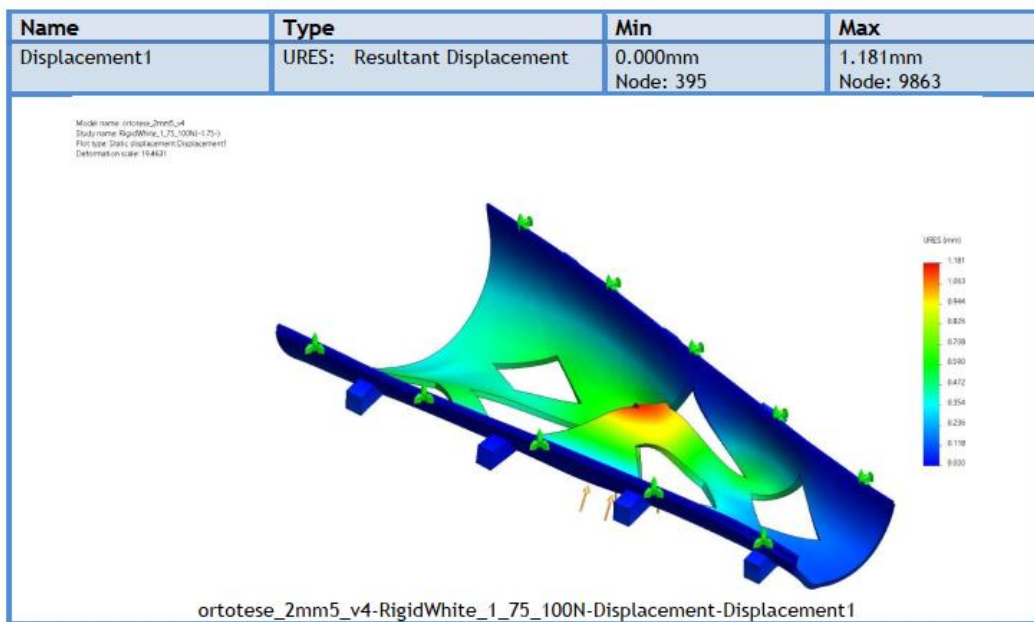
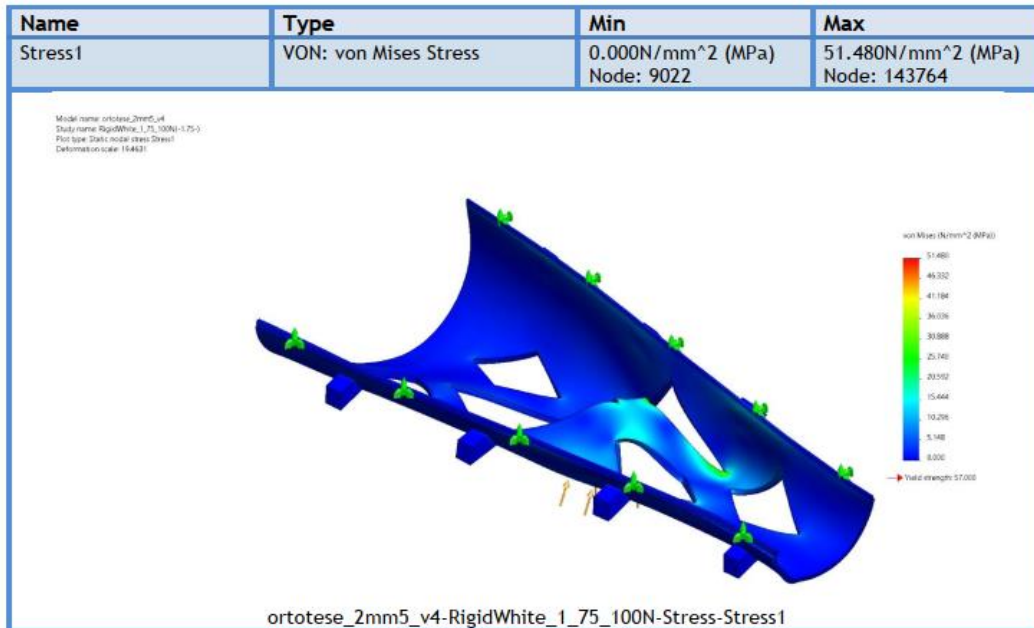
| | |
|--|----------------------|
| Mesh type | Solid Mesh |
| Mesher Used: | Curvature-based mesh |
| Jacobian points for High quality mesh | 16 Points |
| Maximum element size | 1 mm |
| Minimum element size | 0.2 mm |
| Mesh Quality | High |

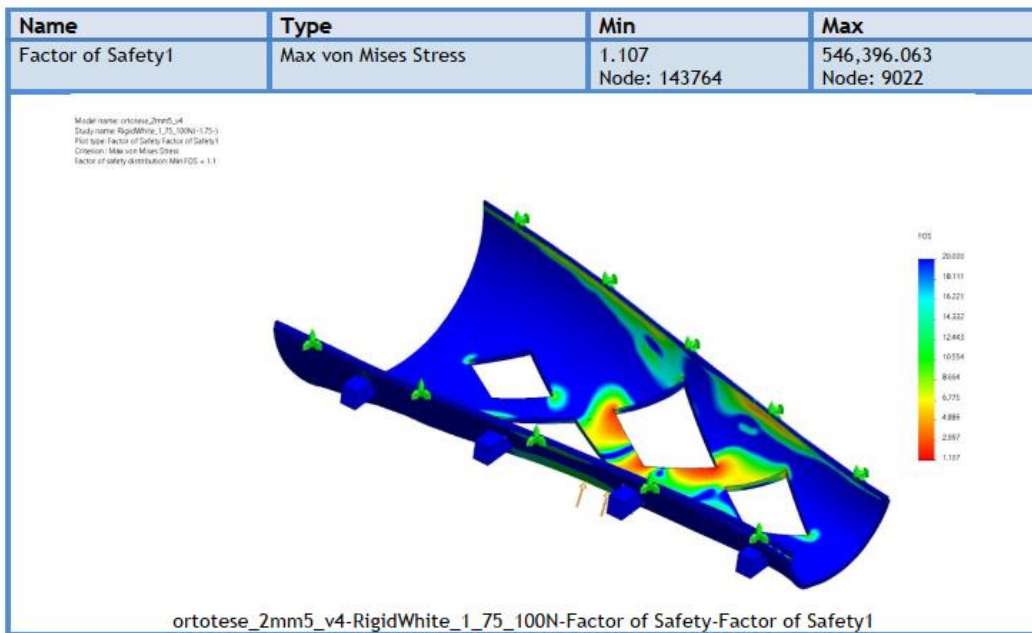
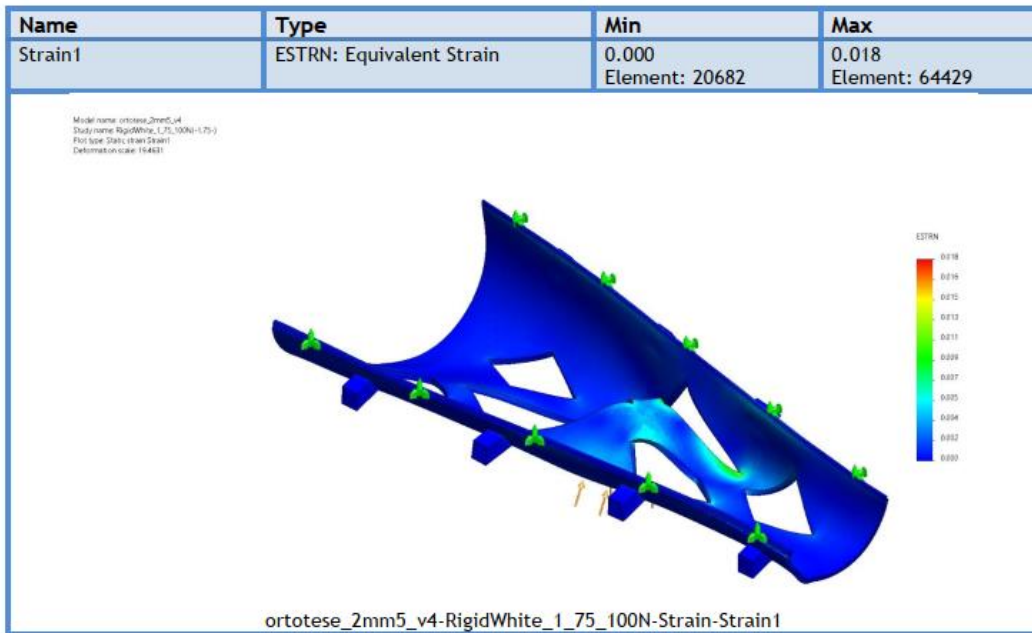
Sensor Details

| Sensor name | Location | Sensor Details |
|---------------|---|---|
| Displacement1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Displacement Component :URES: Resultant Displacement Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |
| Stress1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Stress Component :VON: von Mises Stress Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |



Study Results

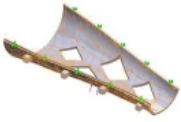





Solidworks simulation ortotese report

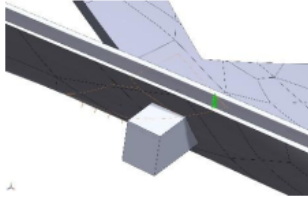
Rigid white - ortotese_2mm5_v4.SLDPRT - 2.5mm - 0N

Material Properties

| Model Reference | Properties | Components |
|---|---|---|
|  | Name: RigidWhite Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 5.70003e+07 N/m ² Tensile strength: 5.70003e+07 N/m ² Elastic modulus: 2.10001e+09 N/m ² Poisson's ratio: 0.3 Mass density: 1,160 kg/m ³ | SolidBody 41(Cut-Extrude13)(ortotese_2mm5_v4) |
| Curve Data:N/A | | |

Loads and Fixtures

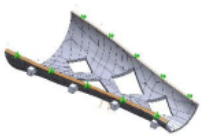
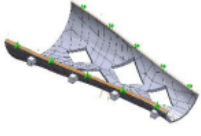
| Fixture name | Fixture Image | Fixture Details | | |
|-------------------------|---|---|----------|------------------|
| Fixed-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry | | |
| Resultant Forces | | | | |
| Components | X | Y | Z | Resultant |
| Reaction force(N) | 2.14303 | -19.103 | 4.00774 | 19.6361 |
| Reaction Moment(N.m) | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Load name | Load Image | Load Details |
|-----------|---|---|
| Force-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Apply normal force Value: 20 N |

Mesh information

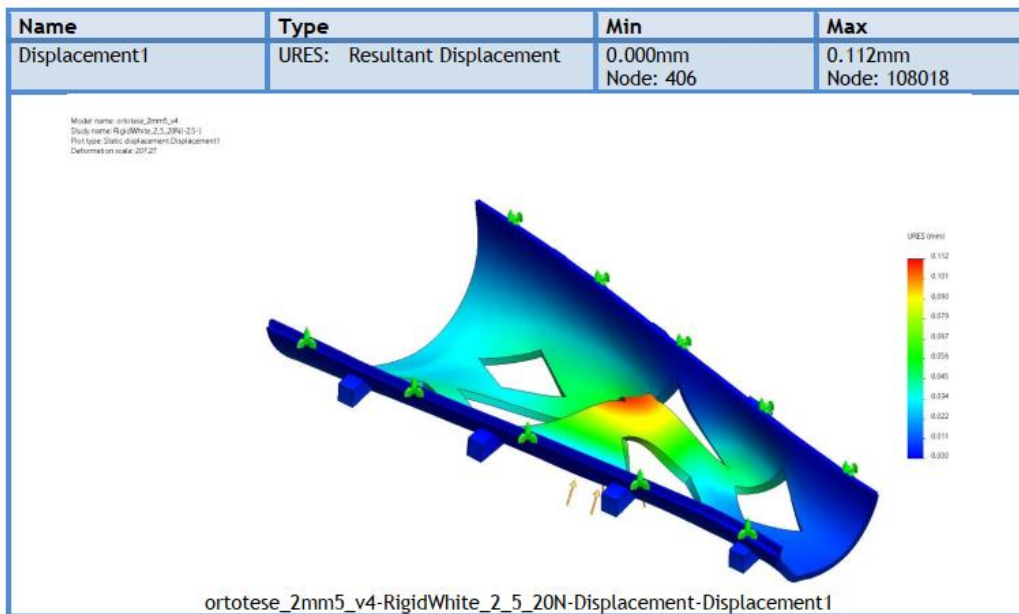
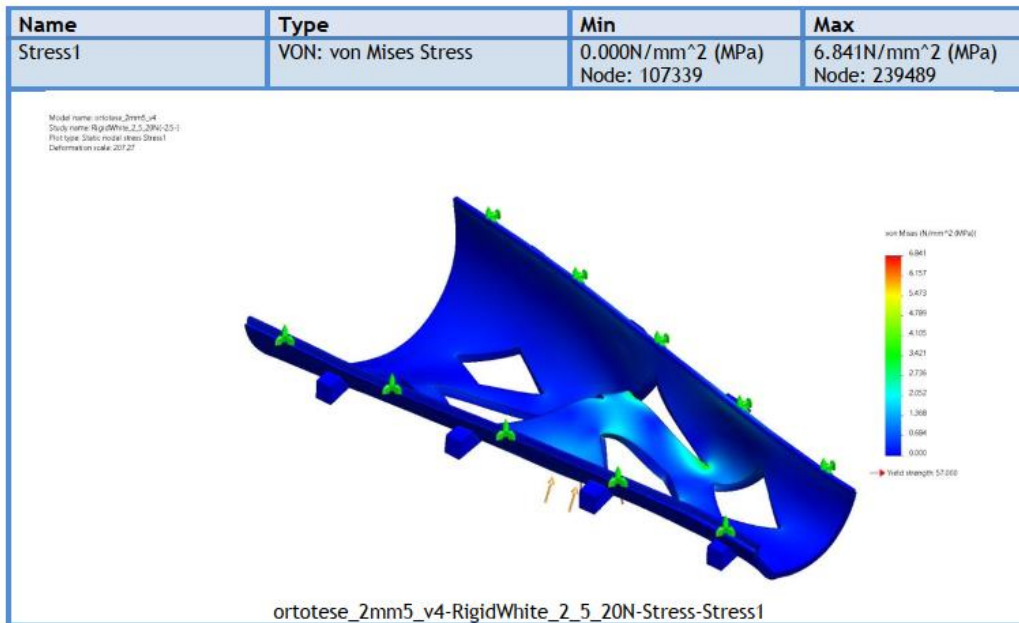
| | |
|--|----------------------|
| Mesh type | Solid Mesh |
| Mesher Used: | Curvature-based mesh |
| Jacobian points for High quality mesh | 16 Points |
| Maximum element size | 1 mm |
| Minimum element size | 0.2 mm |
| Mesh Quality | High |

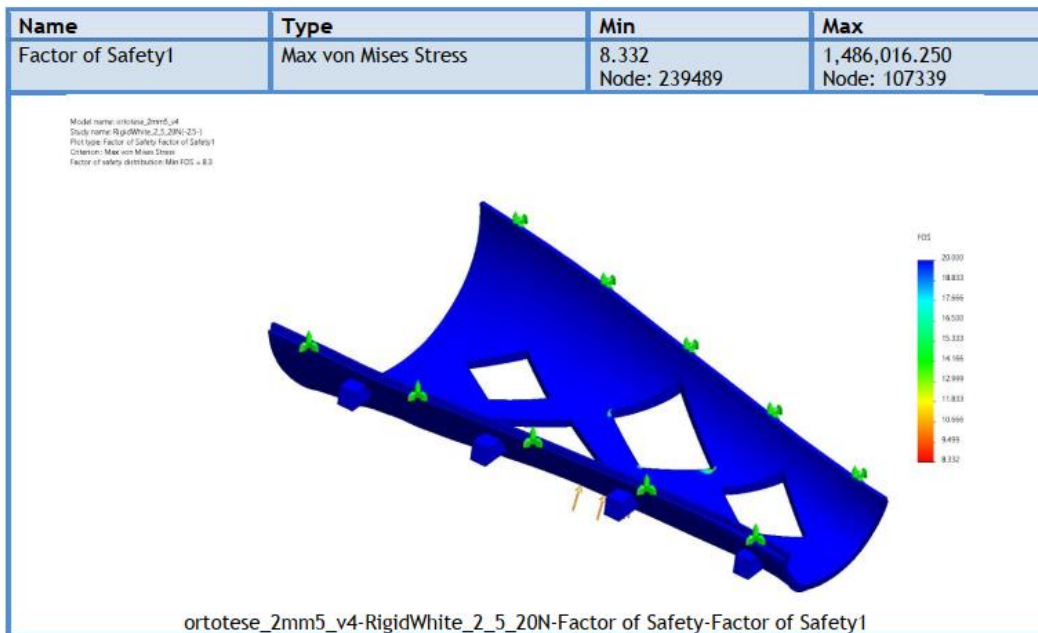
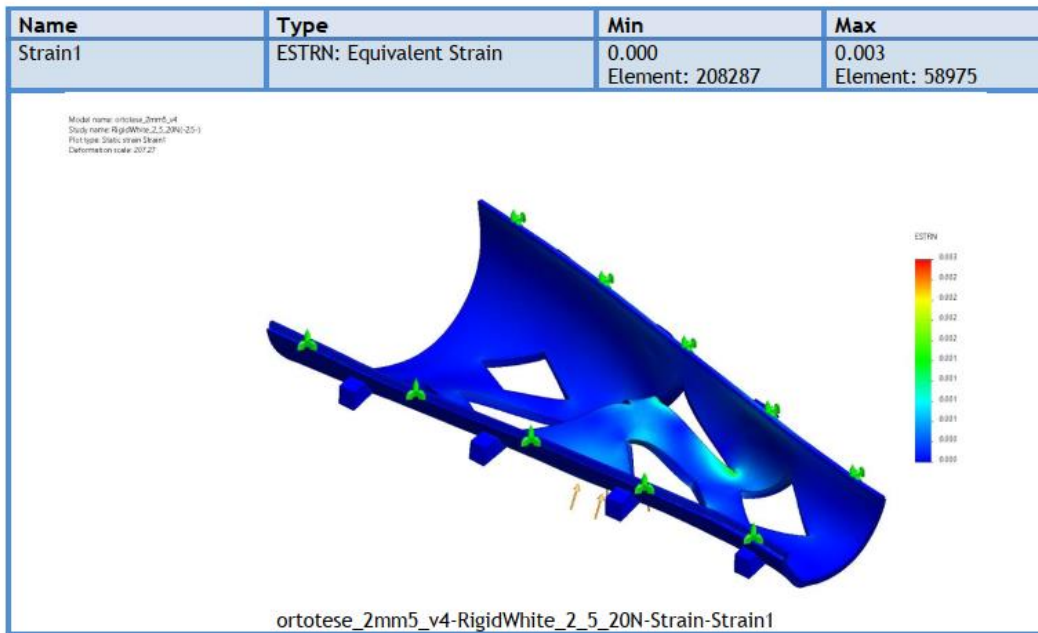
Sensor Details

| Sensor name | Location | Sensor Details |
|---------------|---|---|
| Displacement1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Displacement Component :URES: Resultant Displacement Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |
| Stress1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Stress Component :VON: von Mises Stress Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |



Study Results







Solidworks simulation ortotese report

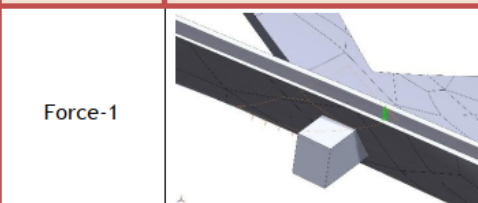
Rigid white - ortotese_2mm5_v4.SLDPRT - 2.5mm - 100N

Material Properties

| Model Reference | Properties | Components |
|---|---|---|
|  | Name: RigidWhite Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 5.70003e+07 N/m ² Tensile strength: 5.70003e+07 N/m ² Elastic modulus: 2.10001e+09 N/m ² Poisson's ratio: 0.3 Mass density: 1,160 kg/m ³ | SolidBody 41(Cut-Extrude13)(ortotese_2mm5_v4) |
| Curve Data:N/A | | |

Loads and Fixtures

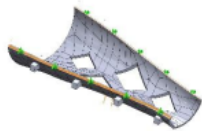
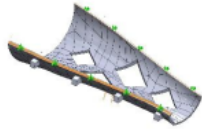
| Fixture name | Fixture Image | Fixture Details | | |
|-------------------------|--|---|----------|------------------|
| Fixed-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry | | |
| Resultant Forces | | | | |
| Components | X | Y | Z | Resultant |
| Reaction force(N) | 10.7151 | -95.5148 | 20.0385 | 98.1807 |
| Reaction Moment(N.m) | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Load name | Load Image | Load Details |
|-----------|---|--|
| Force-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Apply normal force Value: 100 N |

Mesh information

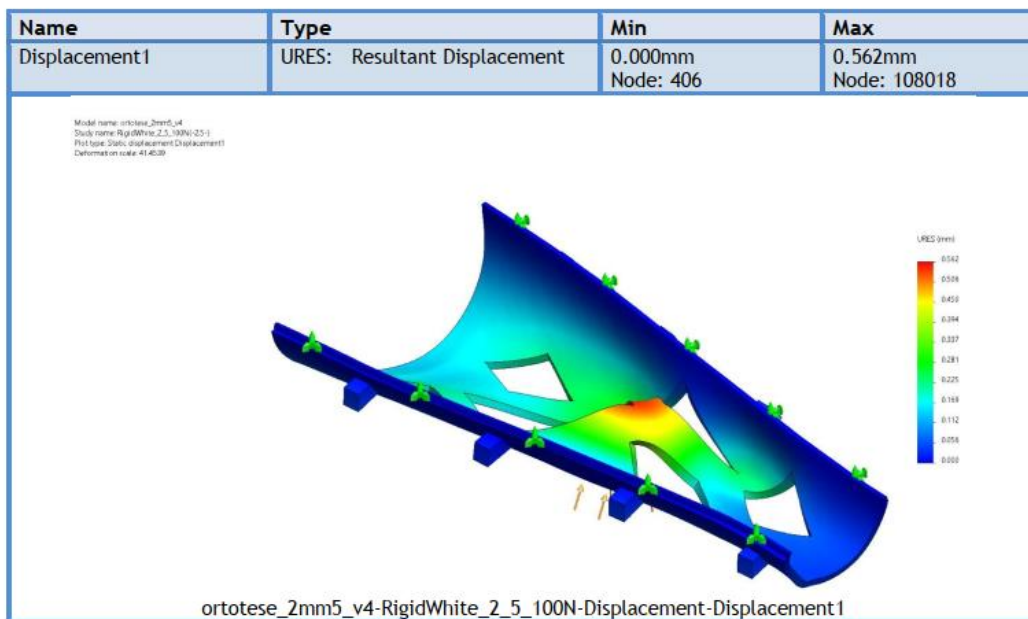
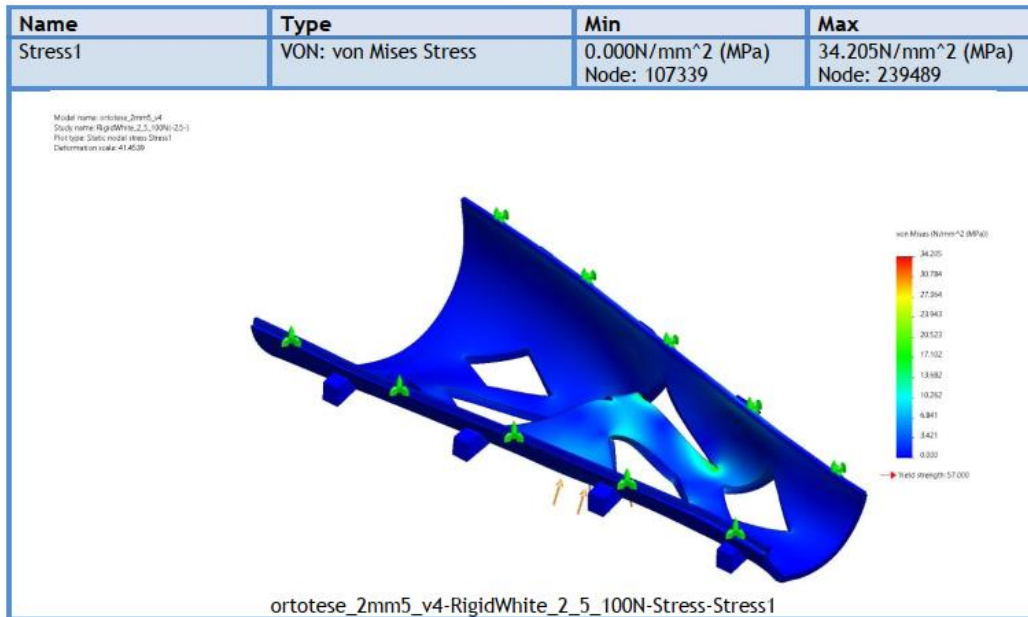
| | |
|--|----------------------|
| Mesh type | Solid Mesh |
| Mesher Used: | Curvature-based mesh |
| Jacobian points for High quality mesh | 16 Points |
| Maximum element size | 1 mm |
| Minimum element size | 0.2 mm |
| Mesh Quality | High |

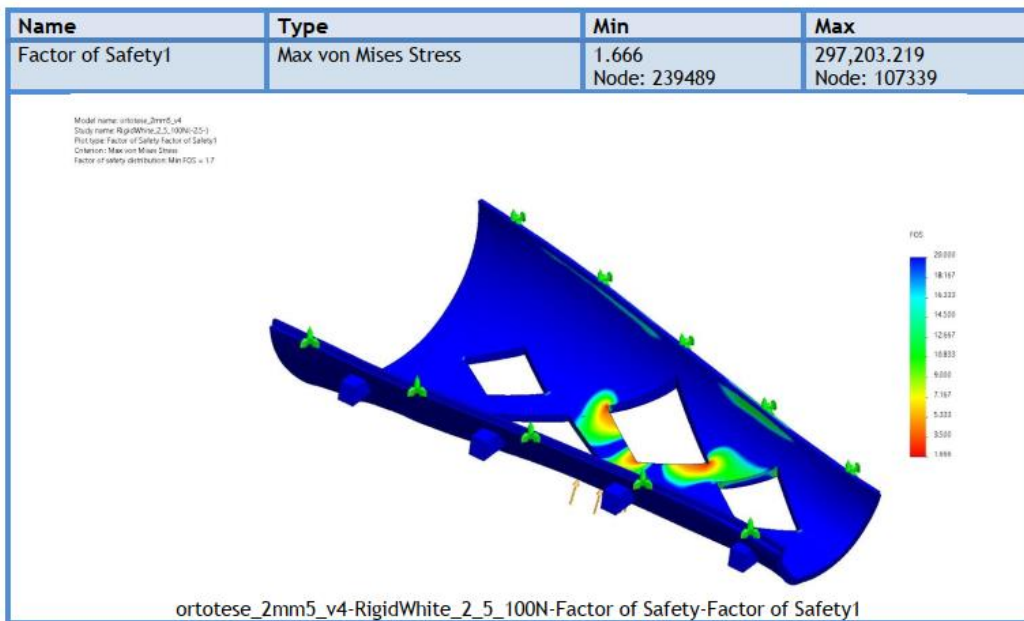
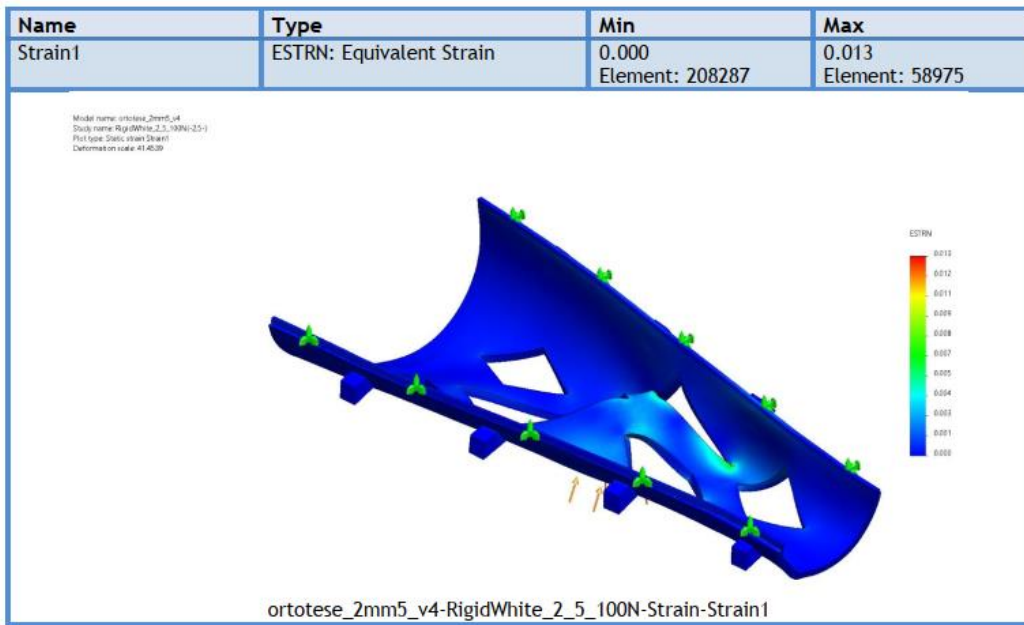
Sensor Details

| Sensor name | Location | Sensor Details |
|---------------|---|---|
| Displacement1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Displacement Component :URES: Resultant Displacement Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |
| Stress1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Stress Component :VON: von Mises Stress Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |



Study Results

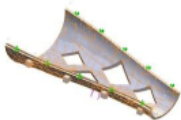





Solidworks simulation ortotese report

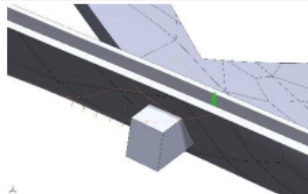
Rigid white - ortotese_2mm5_v4.SLDPRT - 3.25mm - 20N

Material Properties

| Model Reference | Properties | Components |
|---|---|---|
|  | Name: RigidWhite Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 5.70003e+07 N/m ² Tensile strength: 5.70003e+07 N/m ² Elastic modulus: 2.10001e+09 N/m ² Poisson's ratio: 0.3 Mass density: 1,160 kg/m ³ | SolidBody 41(Cut-Extrude13)(ortotese_2mm5_v4) |
| Curve Data:N/A | | |

Loads and Fixtures

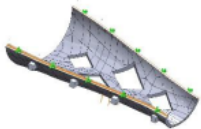
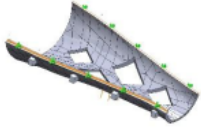
| Fixture name | Fixture Image | Fixture Details | | |
|-------------------------|---|---|----------|------------------|
| Fixed-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry | | |
| Resultant Forces | | | | |
| Components | X | Y | Z | Resultant |
| Reaction force(N) | 2.14321 | -19.1038 | 4.01337 | 19.6381 |
| Reaction Moment(N.m) | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Load name | Load Image | Load Details |
|-----------|---|---|
| Force-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Apply normal force Value: 20 N |

Mesh information

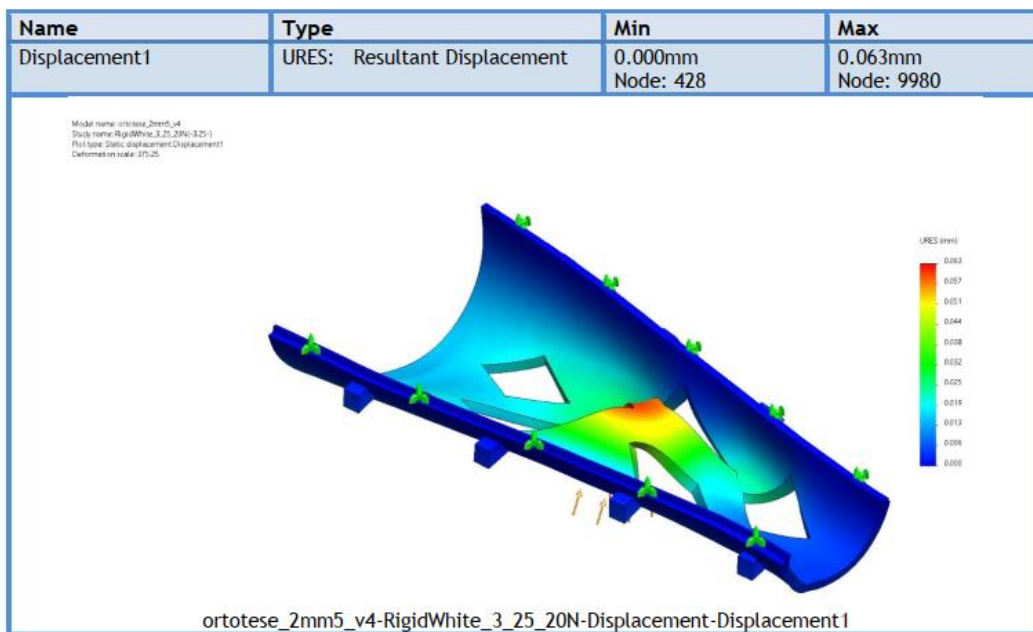
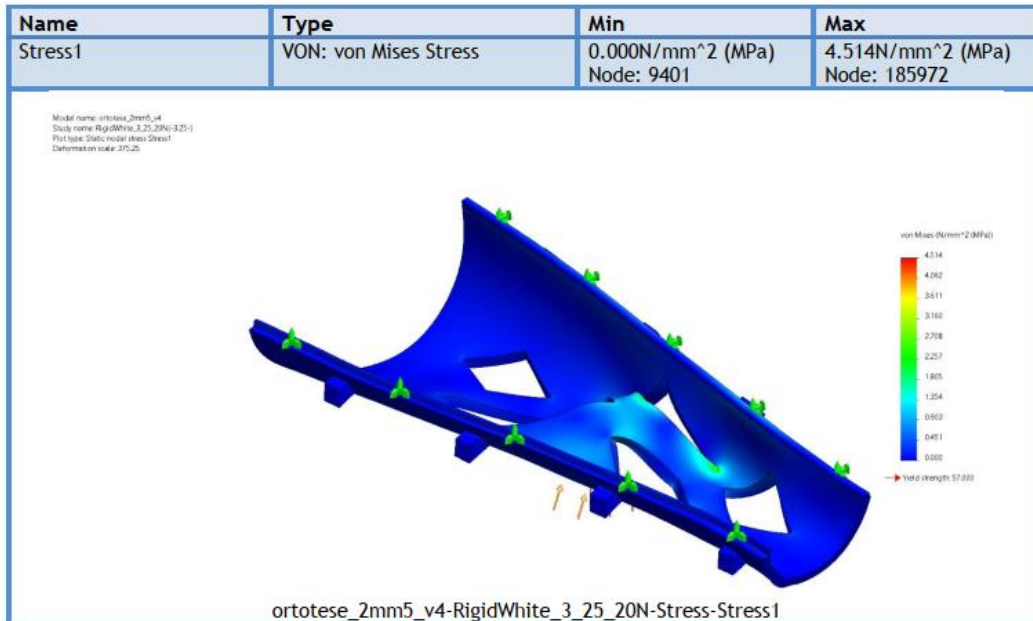
| | |
|--|----------------------|
| Mesh type | Solid Mesh |
| Mesher Used: | Curvature-based mesh |
| Jacobian points for High quality mesh | 16 Points |
| Maximum element size | 1 mm |
| Minimum element size | 0.2 mm |
| Mesh Quality | High |

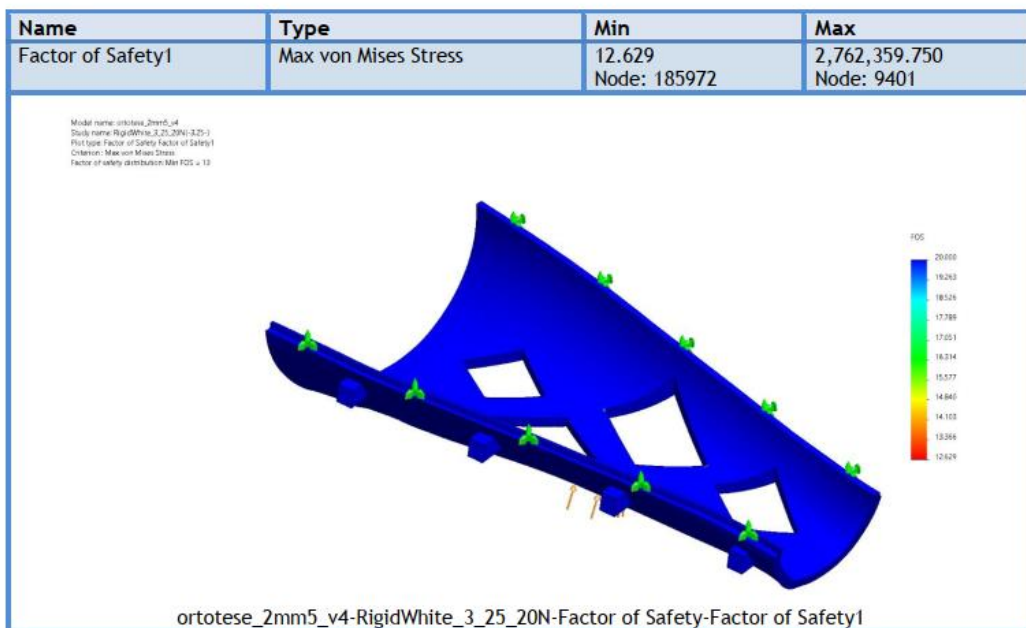
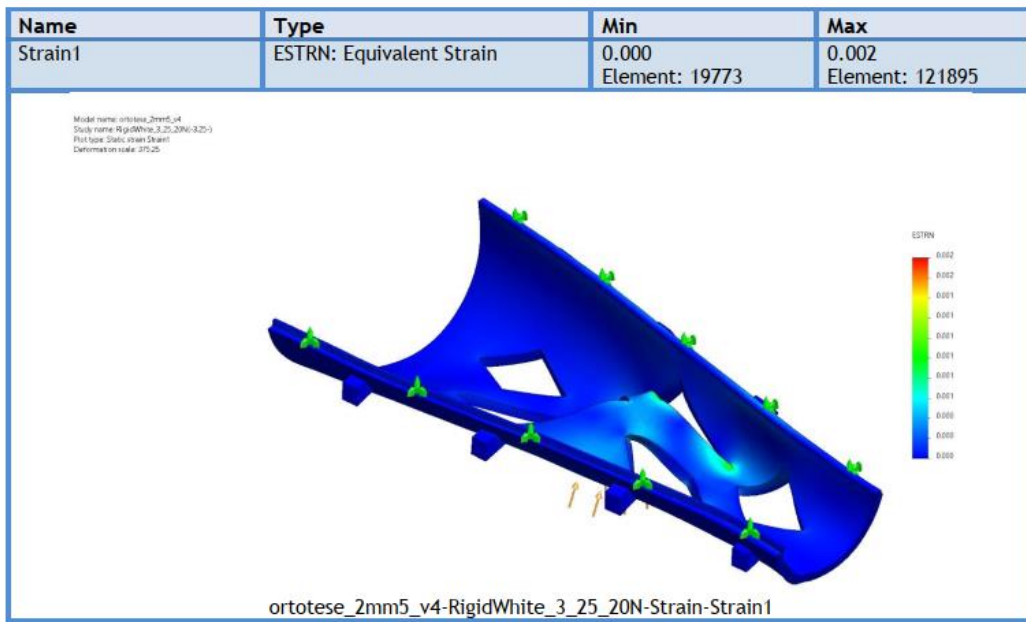
Sensor Details

| Sensor name | Location | Sensor Details |
|---------------|---|---|
| Displacement1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Displacement Component :URES: Resultant Displacement Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |
| Stress1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Stress Component :VON: von Mises Stress Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |



Study Results

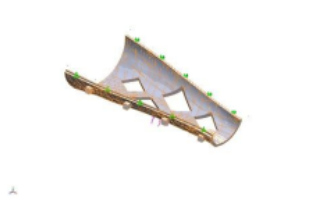





Solidworks simulation ortotese report

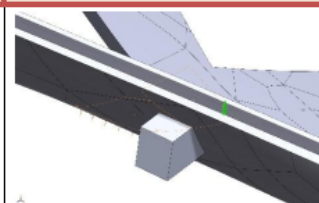
Rigid white - ortotese_2mm5_v4.SLDPRT - 3.25mm - 100N

Material Properties

| Model Reference | Properties | Components |
|---|---|---|
|  | Name: RigidWhite Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 5.70003e+07 N/m ² Tensile strength: 5.70003e+07 N/m ² Elastic modulus: 2.10001e+09 N/m ² Poisson's ratio: 0.3 Mass density: 1,160 kg/m ³ | SolidBody 41(Cut-Extrude13)(ortotese_2mm5_v4) |
| Curve Data:N/A | | |

Loads and Fixtures

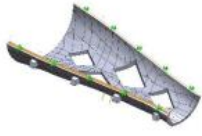
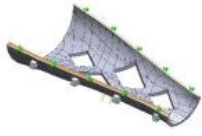
| Fixture name | Fixture Image | Fixture Details | | |
|-----------------------------|--|---|----------|------------------|
| Fixed-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry | | |
| Resultant Forces | | | | |
| Components | X | Y | Z | Resultant |
| Reaction force(N) | 10.716 | -95.5188 | 20.0667 | 98.1904 |
| Reaction Moment(N.m) | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Load name | Load Image | Load Details |
|-----------|---|--|
| Force-1 |  | Entities: 2 face(s) Type: Apply normal force Value: 100 N |

Mesh information

| | |
|--|----------------------|
| Mesh type | Solid Mesh |
| Mesher Used: | Curvature-based mesh |
| Jacobian points for High quality mesh | 16 Points |
| Maximum element size | 1 mm |
| Minimum element size | 0.2 mm |
| Mesh Quality | High |

Sensor Details

| Sensor name | Location | Sensor Details |
|---------------|--|---|
| Displacement1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Displacement Component :URES: Resultant Displacement Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |
| Stress1 |  | Value : Entities :2 face(s) Result :Stress Component :VON: von Mises Stress Criterion :Model Max Step Criterion : Across all Steps Step No.:1 Alert Value: NA |



Study Results

