CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI

DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA PARA ENSAIO BIAXIAL

São Bernardo do Campo

2021

Grupo:

Bruno Oliveira Pintor	12.115.013-0
Paulo Sergio F Souza Junior	12.115.109-6
Leonardo Peres de Campos	12.115.122-9
Luiz Carlos da Silva Ferreira	12.115.195-5
Guilherme Dahlke G Souza	12.115.471-0
Cassia Costa Gonzaga	12.213.469-5
Calebe Gois Kuhn Sandri	12.220.034-8

DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA PARA ENSAIO BIAXIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. Orientado pelo Prof. Dr. Adalto de Farias.

São Bernardo do Campo

2021

Desenvolvimento de uma máquina para ensaio biaxial / Bruno Oliveira Pintor...[et al.]. São Bernardo do Campo, 2021.
100 p. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso - Centro Universitário FEI.
Orientador: Prof. Dr. Adalto de Farias.

1. Máquina. 2. Biaxial. 3. Tração. 4. Manufatura Aditiva. I. Pintor, Bruno Oliveira . II. Sandri, Calebe Gois Kuhn. III. Gonzaga, Cassia Costa. IV. Souza, Guilherme Dahlke G. V. Campos, Leonardo Peres de . VI. Ferreira, Luiz Carlos da Silva. VII. Junior, Paulo Sergio F Souza. VIII. Farias, Adalto de, orient. IX. Título.

Elaborada pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da FEI com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Grupo:

Bruno Oliveira Pintor	12.115.013-0
Paulo Sergio F. Souza Junior	12.115.109-6
Leonardo Peres de Campos	12.115.122-9
Luiz Carlos da Silva Ferreira	12.115.195-5
Guilherme Dahlke G. Souza	12.115.471-0
Cassia Costa Gonzaga	12.213.469-5
Calebe Gois Kuhn Sandri	12.220.034-8

DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA PARA ENSAIO BIAXIAL

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Comissão julgadora

_____

Orientador e presidente

_____

Examinador (1)

_____

Examinador (2)

São Bernardo do Campo

21 de Junho de 2021

Dedicamos este projeto a todos os professores, que neste período deram o seu melhor para que o conhecimento de uma vida inteira fosse absorvido em poucas horas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos nossos familiares pelo apoio e paciência durante todos esses anos de árduo trabalho e dedicação.

Aos nossos professores e mestres pelo conhecimento passado e por sempre exigirem o máximo de nós para sermos o melhor que podemos.

Aos amigos que cruzaram nossos caminhos e contribuíram para o nosso crescimento pessoal e profissional, e aos envolvidos direta e indiretamente para que a realização desse projeto fosse possível.

Ao professor Dr. Mohammad Hossein Shaterzadeh Yazdi por todo o suporte e conhecimentos sobre Método de Elementos Finitos e uso do *software* Ansys.

“Sapere aude!”

(Immanuel Kant)

RESUMO

Não é de hoje que os polímeros estão presentes em nosso cotidiano aplicados em diversas áreas, sendo encontrados em embalagens, tecidos e qualquer outro produto produzido pela indústria, mas recentemente eles têm sido apresentados de uma forma diferente.

Apesar de conhecermos estudos datados da década de 80, a manufatura aditiva ficou amplamente conhecida na última década, trazendo uma nova abordagem à maneira em que diversas peças podem ser criadas. Neste processo de fabricação, os polímeros são os materiais mais conhecidos, comumente utilizados através dos métodos de foto polimerização, por pó ou a mais popular, extrusão, sendo este conjunto de processos responsável por um impacto de 550 bilhões de dólares por ano na economia em 2025, de acordo com a empresa de consultoria empresarial americana *McKinsey & Company*.

Embora as aplicações citadas apresentem suas vantagens, uma característica crítica encontrada em materiais poliméricos e peças produzidas através da manufatura aditiva em geral é a anisotropia. Sabendo da importância dessa característica para implementação desses materiais nas diversas áreas da engenharia e a dificuldade de encontrar empresas e equipamentos locais que realizam testes capazes de mensurar este efeito, o trabalho focou-se no desenvolvimento de uma máquina de ensaio biaxial, que servirá para visualizar e medir os efeitos anisotrópicos nos materiais em questão.

O desenvolvimento deste equipamento provê uma alternativa nacional para realização de testes biaxiais, proporcionando avanço tecnológico e diversos estudos que servirão como base tanto para o fenômeno da anisotropia, quanto para o equipamento em si.

Palavras-chave: Máquina. Biaxial. Manufatura Aditiva.

ABSTRACT

It is not odd to see polymers used in our daily lives for multiple applications. They can be encountered in envelopment, fabrics, and any other industrial product, but recently they have been shown in a different way.

Although we know studies dated since the 80s-decade, additive manufacturing has been widely known in the last decade. In AM, the polymers are the most known materials, commonly used through the photopolymerization method, through powder fusion or the most usual fused filament extrusion. All these processes will be responsible for an impact of 550 billion dollars per year on the economy in 2025, according to the American business consulting firm McKinsey & Company.

Although the applications named here have their advantages, one critical property found in polymeric materials and equipment manufactured through AM is, in general, anisotropy. Knowing the importance of this property for these materials' implementation in the different areas of engineering and the difficult to find companies and local equipment that test the material and can measure its behavior because of this kind of effect, the work focused on the development of a biaxial testing machine, which will serve to visualize and measure the anisotropic effects on the materials in question.

The development of this equipment provides a national alternative to perform biaxial tests, providing technological advancement and several studies that will serve as a basis for both the anisotropy phenomenon and the equipment itself.

Keywords: Machine. Biaxial. Additive Manufacturing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Número de pesquisas sobre o tema impressão 3D/Manufatura Aditiva 13
Figura 2 - Processo de fabricação através da adição de camadas 15
Figura 3 - Estrutura de um material anisotrópico 15
Figura 4 - Deposição do preenchimento em duas camadas perpendiculares 16
Figura 5 - Representação de um ensaio de tração uniaxial 17
Figura 6 - Diagrama tensão x deformação convencional e real 18
Figura 7 - Representação de um ensaio de tração biaxial 19
Figura 8 - Representação do ensaio de compressão 20
Figura 9 - *Design* proposto pela ISO 16842:2014 24
Figura 10 - Corpo de provas proposto 25
Figura 11 – Propriedade Mecânica dos polímeros da manufatura aditiva 26
Figura 12 – Sistema completo Motor – Regulador 29
Figura 13 - Elementos de construção do atuador 29
Figura 14 – Tipo de Célula de Carga 30
Figura 15 - Célula de Carga U9C 31
Figura 16 - Dimensões da célula de carga 31
Figura 17 – Cotas da Célula de Carga U9C 31
Figura 18 - Propriedades da célula de carga 32
Figura 19 - Mais propriedades da célula de carga 33
Figura 20 – Chapa em “cruz” 34
Figura 21 – Sistema de fixação tipo “Morsa” 35
Figura 22 – Estrutura em alumínio e perfil escolhido 35
Figura 23 – Compartimentos dos componentes elétricos, suporte da IHM e proteção 36
Figura 24 - Vista isométrica da última revisão 36
Figura 25 – Vista isométrica da máquina revisão 1 37
Figura 26 - Vista isométrica da máquina revisão 2 37
Figura 27 – Vista isométrica da última revisão com transparência no compartimento 38
Figura 28 - Ferramentas Workbench Ansys 2019 R3 40
Figura 29 - Análise Estática Estrutural e Modal 41
Figura 30 - Configurações de Geometria 41
Figura 31 - Configurações de Material 42
Figura 32 - Configurações da Malha 42

Figura 33 - Configurações de Variáveis 43
Figura 34 - Configurações de Resultados 44
Figura 35 - Vista Explodida do Equipamento (sem armário) 45
Figura 36 - Geometria da Chapa em Cruz 46
Figura 37 - Dados da Malha Hex Dominant 46
Figura 38 - Dados Gerais da Malha 47
Figura 39 - Malha Final em um "braço" da chapa em cruz 47
Figura 40 - Vista Lateral do Atuador 48
Figura 41 - Pontos de fixação da chapa em cruz 48
Figura 42 - Momento gerado pelo atuador 49
Figura 43 - Deformação causada pelos momentos 49
Figura 44 - Tensões ao longo da peça 50
Figura 45 - Área com maior tensão registrada 50
Figura 46 - Força na chapa 51
Figura 47 - Deformação causada pelas forças 52
Figura 48 - Tensões ao longo da peça 52
Figura 49 - Área com maior tensão registrada 53
Figura 50 - Modelamento com apenas 1 força por eixo 54
Figura 51 - Deformação causada pelas forças 55
Figura 52 - Compartilhamento de dados entre as análises 55
Figura 53 - Modos de frequência observados 56
Figura 54 - Estrutura representada em elementos 1D 57
Figura 55 - Área transversal do perfil escolhido 57
Figura 56 - Representação das massas indicadas 58
Figura 57 - Malha final na estrutura 58
Figura 58 - Estrutura com todos os elementos representados 59
Figura 59 - Deformação causada pelos deslocamentos 60
Figura 60 - Tensões causadas pelos deslocamentos 60
Figura 61 - Compartilhamento de dados entre análises 61
Figura 62 - Modos de frequência observados 61
Figura 63 - Volume do atuador removido 62
Figura 64 - Resultado da simplificação 62
Figura 65 - Malha final 63
Figura 66 - Pontos de fixação 63

Figura 67 - Força de aperto nos parafusos....64
Figura 68 - Área de aplicação dos momentos....64
Figura 69 - Tensões obtidas nos parafusos....65
Figura 70 - Área de tensão máxima....65
Figura 71 - Máxima tensão no parafuso....66
Figura 72 - Path no corpo de provas....67
Figura 73 - Malha final....67
Figura 74 - Dados inseridos para simulação....68
Figura 75 - Tensões no corpo de provas....68
Figura 76 - Áreas de tensão máxima....69
Figura 77 - Tensões observadas no Path....70
Figura 78 - Novas tensões observadas no Path....70
Figura 79 - Deformações observadas....71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de Decisão 27
Tabela 2 – Dados técnicos do atuador 28
Tabela 3 - Deformações por eixo (Gerado pelo momento) 51
Tabela 4 - Deformações por eixo (Gerado pela força) 53
Tabela 5 - Deformações por eixo (Gerado pela força) 54
Tabela 6 - Lista de Materiais 72

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
1.1 MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO 11
1.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 14
1.2.1 Anisotropia 14
1.2.2 Ensaios de Tração 16
1.2.3 Ensaio de Compressão 19
1.2.3.1 Limitações do Ensaio 21
1.2.4 Propriedades Mecânicas 21
2 DESENVOLVIMENTO 23
2.1 CORPO DE PROVA 23
2.2 DEFINIÇÃO PRÉVIA DA CAPACIDADE DO EQUIPAMENTO 25
2.3 ATUADORES 26
2.4 SENSORES 30
3 DETALHES DO EQUIPAMENTO 34
3.1 COMPONENTES DA MÁQUINA 34
3.2 OTIMIZAÇÕES 37
4 SIMULAÇÕES 39
4.1 APRESENTAÇÃO DO ANSYS WORKBENCH 2019 R3 - ACADEMIC 39
4.2 ANÁLISE DA CHAPA EM CRUZ 44
4.2.1 Análise Estática Estrutural da Chapa em Cruz 45
4.2.2 Análise Modal da Chapa em Cruz 55
4.3 ANÁLISE DA ESTRUTURA DE PERFIS METÁLICOS 56
4.3.1 Análise Estática Estrutural de Perfis de Alumínio 57
4.3.2 Análise Modal da Estrutura de Perfis de Alumínio 61
4.4 ANÁLISE DA FIXAÇÃO DOS ATUADORES 62
4.5 ANÁLISE DO CORPO DE PROVAS 66
5 ORÇAMENTO DO PROJETO 72
6 CONCLUSÕES 73
REFERÊNCIAS 74
ANEXO A – DETALHAMENTO DO EQUIPAMENTO 80

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO

Respostas multiaxiais não são simples de calcular, pois trata-se de uma rede de esforços complexa e ampla, ainda mais complicada quando observadas em materiais anisotrópicos. Para estudos de formas complexas suscetíveis a esforços multiaxiais em suas diferentes partes, utiliza-se do método de elementos finitos aliado a computadores de processamento muito mais alto que a capacidade humana para simular os possíveis esforços ao longo de uma estrutura. Alguns métodos utilizados são, por exemplo, a medição de deformação de Hencky (SHUTOV, 2019) que é a mais recomendada por necessitar de um menor número de iterações e cálculos para conseguir um resultado coerente. Outra possibilidade é o modelo hiper elástico, porém todos esses métodos necessitam de valores de entrada associados ao material a ser utilizado.

Para conseguir esses valores de entrada são necessários testes que podem corrigir possíveis constantes associadas ao modelo por métodos como o dos campos virtuais (PEARCE, 2017). Esses valores tornam-se ainda mais variáveis, necessitando de maior número de ensaios, quando utilizados materiais com alta taxa de variedade comportamental devido as diferentes variáveis do processo (WUA, 2020) ou materiais desconhecidos.

O propósito desse equipamento a ser desenvolvido é trabalhar com materiais com essas características, também pouco conhecidos, devido a sua recente emergência. Materiais biomecânicos têm uma necessidade cada vez maior de resultados mais consistentes para o seu comportamento nos recentes desenvolvimentos (SHUTOV, 2019), como tecidos biomédicos, que são anisotrópicos e não lineares (NODER, 2019). Esses meios são conhecidos por fazerem uso de testes mais simples para a representação de seus comportamentos devido ao alto custo e escasso material de ensaios multiaxiais e muitas vezes é recomendável que sejam feitos tais testes (NODER, 2019).

Um processo recente e que também vem sendo muito comentado é a manufatura aditiva. Ela tem sido empregada em campos como a indústria aeroespacial, automotiva, aparelhos eletrônicos, infraestrutura civil, implantes médicos, nos quais há apenas recentes estudos sobre as variáveis do processo e seu impacto nas propriedades mecânicas resultantes (GREER, 2011). Esse processo também tem sido empregado para pegadores, atuadores pneumáticos, sensores flexíveis além de elastômeros de silicone e material que pode ser vestido e customizado (MARTINS, 2019).

O método utilizado para esses últimos é o mais comum, a extrusão de filamento fundido, que em 2016 apresentou 96% das máquinas 3D compradas no mundo inteiro. Esse método além de apresentar alta anisotropia em seus resultados, tem também uma variedade muito grande das

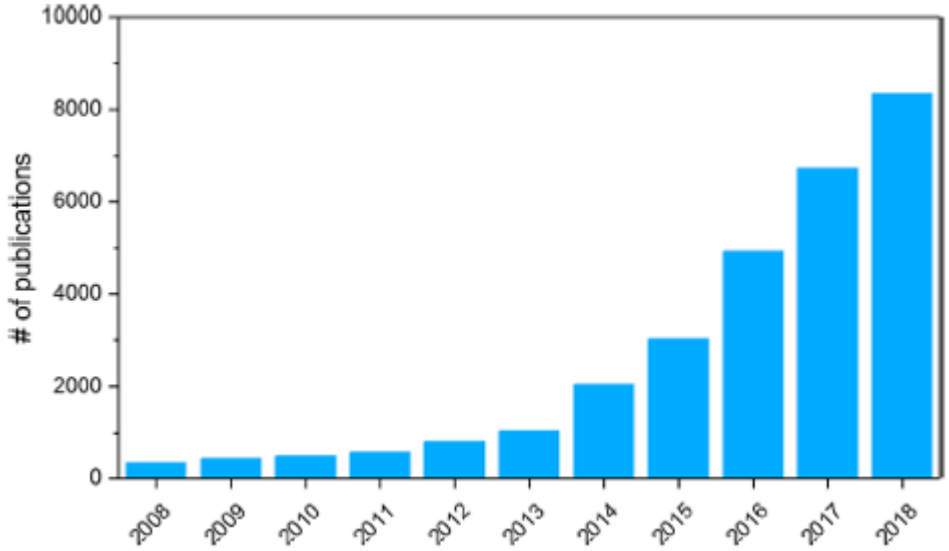
propriedades a partir de variáveis como a direção de aplicação do fio, a estrutura e entrelaçamento dele, temperatura, velocidade de deposição etc. Para ele, surgem novos estudos de tratamentos pós-processual para melhora de algumas propriedades como a utilização de solventes e epóxis (PUTRA, 2017). Tudo isso gera resultados muito variáveis do ponto de vista de suas propriedades, além de serem estudos recentes.

O número de pesquisas pelo termo manufatura aditiva vem se tornando maior com o decorrer dos anos, como pode ser observado na Figura 1, e apesar de ainda ser novo para algumas pessoas, esse processo de fabricação de peças através da adição de camadas já é conhecido em todo o mundo e o método de extrusão, em específico, já foi até indicado como uma das oito tecnologias que vão mudar os negócios do futuro, pelo grupo financeiro multinacional Goldman Sachs em reportagem da revista Você S/A.

Puxada pela acessibilidade de impressoras 3D, que estão cada vez mais baratas e simples de usar, o mercado da manufatura aditiva cresceu 21,2% em 2019, chegando a um total de 12 bilhões de dólares (SENAI, 2021). Atualmente, podemos encontrar desde itens para decoração até peças para a indústria automobilística, próteses e casas inteiras, todas fabricados através deste método. Através de várias pesquisas de mercado, fica claro que a manufatura aditiva veio para ficar e tem um potencial enorme para crescer conforme novas tecnologias são criadas.

Também parte do contexto do nosso estudo, os polímeros pertencem a um grupo de materiais o quais estão cada vez mais presentes no nosso dia a dia e apresentando crescimento contínuo ano após anos, chegando aos 569 bilhões de dólares em 2019 (GRAND VIEW RESEARCH, 2020).

Figura 1 - Número de pesquisas sobre o tema impressão 3D/Manufatura Aditiva



Fonte: Recent developments in polymers/polymer nanocomposites for additive manufacturing, Science Direct Website, Junho 2020.

Com a grande preocupação sobre o ciclo de vida desses materiais e a sustentabilidade, oportunidades tem surgido para os materiais biodegradáveis, abrindo portas para um mercado que em breve passará de apenas um nicho de mercado para um material presente em nosso cotidiano.

Uma característica crítica para a implementação da manufatura aditiva e dos polímeros em geral é a anisotropia, fenômeno quer será explicado mais detalhadamente ao longo desta dissertação.

Para os ensaios multiaxiais referidos são possíveis alguns métodos de teste. O método utilizando punções, Marciniak, tem o problema do atrito dos materiais e o bulge hidráulico, apesar de não apresentar esse mesmo atrito (MEDELLÍN, 2016), apresenta um problema comum a todos os métodos, flexão do material e consequente imprecisão de seus resultados. Outras possibilidades são os métodos tubular, que é específico para testes de torção e hidrodinâmicos e o Arcan, que tem a limitação de proporcionar apenas testes de força cortante mais tração (JIANG, 2020) (HUYNH, 2020) (HAO, 2019) (GHANDRIZ, 2019) (*Failure prediction of hybrid composite using Arcan's device and, 2017)*.

Por fim temos as máquinas biaxiais com a possibilidade de testes de tração-tração, tração-compressão, compressão-compressão, além da possibilidade da utilização de esforços não equibiaxiais, além de já existirem equipamentos capazes de fazer testes de força cortante

também (NODER, 2019). Por essas razões citadas fizemos um estudo de uma máquina de ensaios biaxiais.

Para a avaliação do comportamento de peças em polímeros, geralmente é feito um ensaio biaxial, o qual pistões exercem esforços em dois eixos perpendiculares, apresentando valores de tensão e mostrando visualmente o efeito da anisotropia na prática.

Máquinas de ensaios biaxiais não são equipamentos que surgiram na última década, mas o avanço tecnológico e a necessidade por este equipamento criaram uma demanda crescente com o passar dos anos.

Atualmente, há algumas empresas no mercado que desenvolvem e entregam um produto pronto capaz de realizar e medir as variáveis necessárias para o estudo, mas geralmente a um custo elevado e intervalo de aplicações alto. Grande parte destas empresas dispõem de equipamentos de grande porte capazes de realizar testes com uma força de até 250 kN ou de pequeno porte, para forças de até 200 N e que podem chegar a custar valores muito altos, na casa de centenas de milhares de dólares. Máquinas neste intervalo também podem ser encontradas, mas não são as mais comuns e, portanto, não são encontradas com tantos fabricantes.

Com estas informações, o grupo entendeu que há uma carência de um equipamento que possa atender grande parte dos materiais poliméricos usados na manufatura aditiva e até uma gama grande de materiais poliméricos em geral, sem estar superdimensionado para a aplicação. Desenvolvendo um equipamento direcionado a este setor, apresentaremos uma solução mais adequada e que será capaz de atender esta demanda que será cada vez maior.

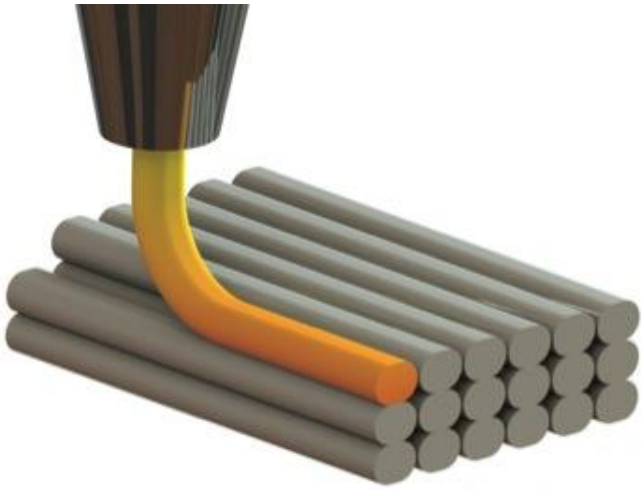
1.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.2.1 ANISOTROPIA

A manufatura aditiva apresenta um conjunto de tecnologias usadas para a fabricação de objetos físicos a partir de fontes de dados gerados por sistemas de projeto auxiliado por computador. Eles apresentam diversas vantagens quando comparados aos processos de fabricação clássicos baseados em remoção de material, como a usinagem e o fresamento por exemplo.

Podemos definir a manufatura aditiva como um processo de fabricação através da adição de material em forma de camadas, uma sobre a outra, até que se obtenha o produto desejado, conforme Figura 2.

Figura 2 - Processo de fabricação através da adição de camadas

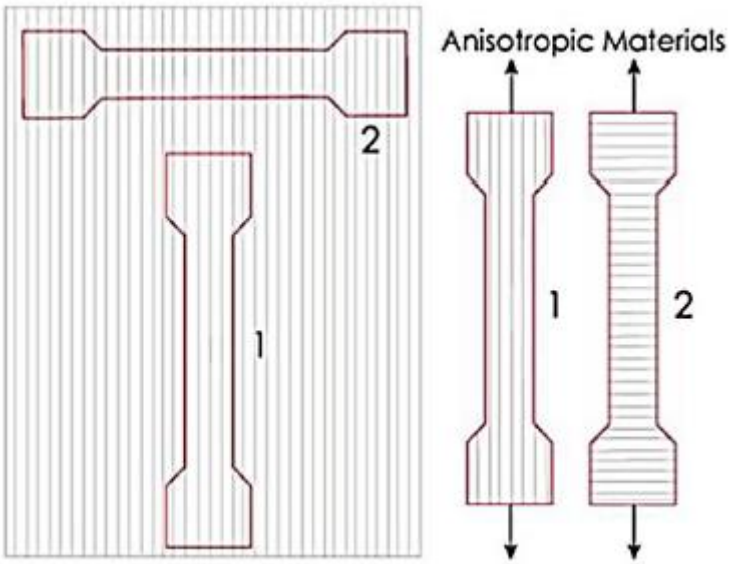


Fonte: Boa Impressão 3D, Fevereiro 2017

Este tipo de aplicação gera no material uma propriedade física que depende da direção cristalográfica em que as medições são feitas. Essa direcionalidade de propriedades é chamada de anisotropia, que podemos encontrar em materiais que apresentam estrutura cristalizada, como os metais e alguns polímeros.

Na Figura 3 podemos notar que essa direcionalidade não é aplicável para propriedades volumétricas como densidade e calor específico, mas todos os demais tipos de comportamento são suscetíveis à anisotropia.

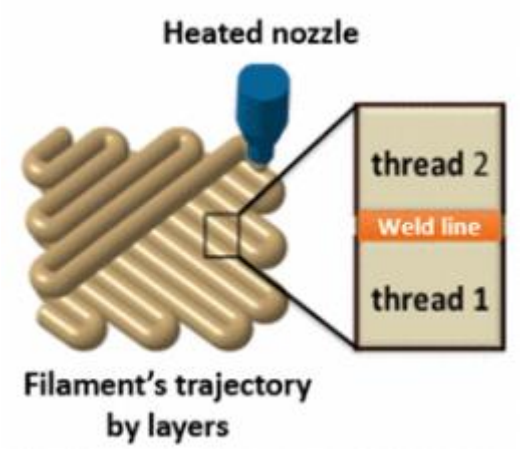
Figura 3 - Estrutura de um material anisotrópico



Fonte: Filament2print, Maio 2020

Através da manufatura aditiva, podemos minimizar o efeito da anisotropia variando a direção da adição de camada, orientando para que seja feita em 90° em relação a camada anterior, como podemos ver na Figura 4.

Figura 4 - Deposição do preenchimento em duas camadas perpendiculares

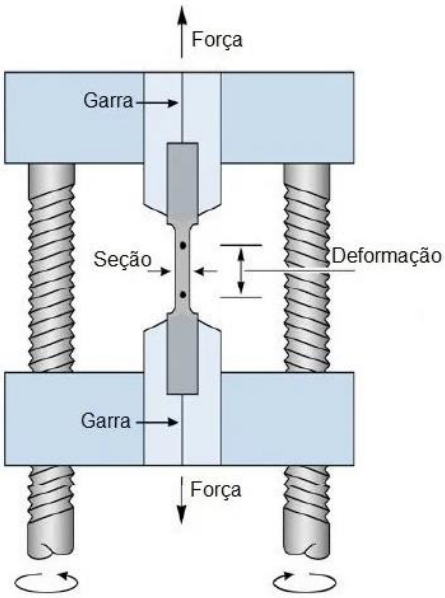


Fonte: GARDAN, MAKKE, RECHO (2018)

1.2.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO

O ensaio de tração é um tipo de ensaio mecânico destrutivo, aplicado pelas indústrias para determinar as propriedades mecânicas de um material, onde é aplicado um esforço uniaxial nas extremidades de um corpo de prova ou produto acabado, que o deforma até o rompimento. Temos na Figura 5 uma representação do ensaio em questão.

Figura 5 - Representação de um ensaio de tração uniaxial



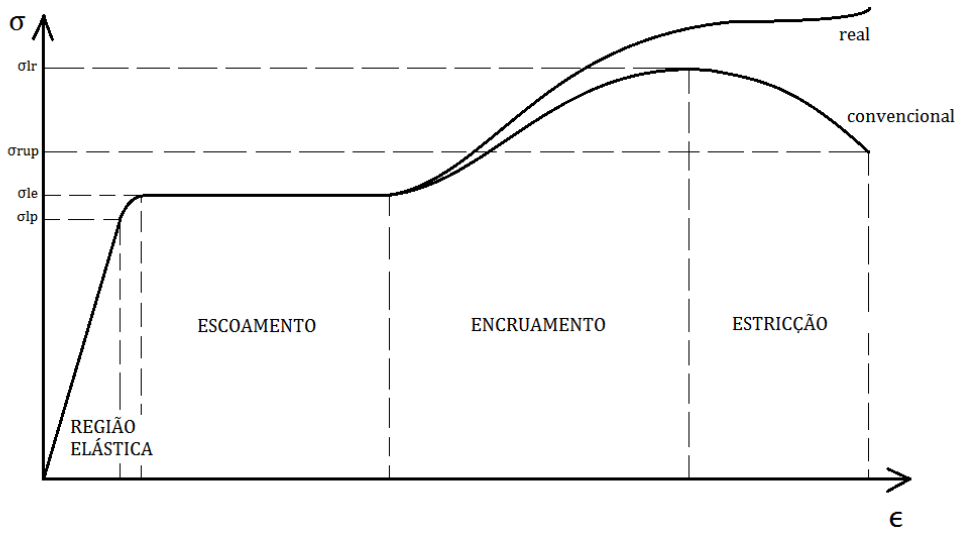
Fonte: Biopdi, 2020

Durante o processo, os valores de força aplicada e os valores de deformação são monitorados e controlados através de sensores que ficam alocados próximo ao corpo de prova.

Neste tipo de ensaio, as deformações aplicadas no corpo de prova são uniformemente distribuídas em toda a sua extensão, até atingir uma carga máxima próxima do final do ensaio e, como a carga cresce numa velocidade controlada e de forma lenta durante todo o processo, o ensaio permite medir de forma satisfatória a resistência do material estudado.

A deformação do corpo de prova é uniforme, permitindo assim que seja possível avaliar essa deformação através da tensão que está sendo aplicada. Essa variação é determinada pela representação do gráfico tensão-deformação (Figura 6), que pode ser obtido diretamente pela máquina de ensaio de tração. A uniformidade termina quando é atingida a carga máxima suportada pelo material, quando começa a aparecer o fenômeno da estricção ou da diminuição da seção do corpo de prova.

Figura 6 - Diagrama tensão x deformação convencional e real



Fonte: O Pórtico.com, Outubro 2015

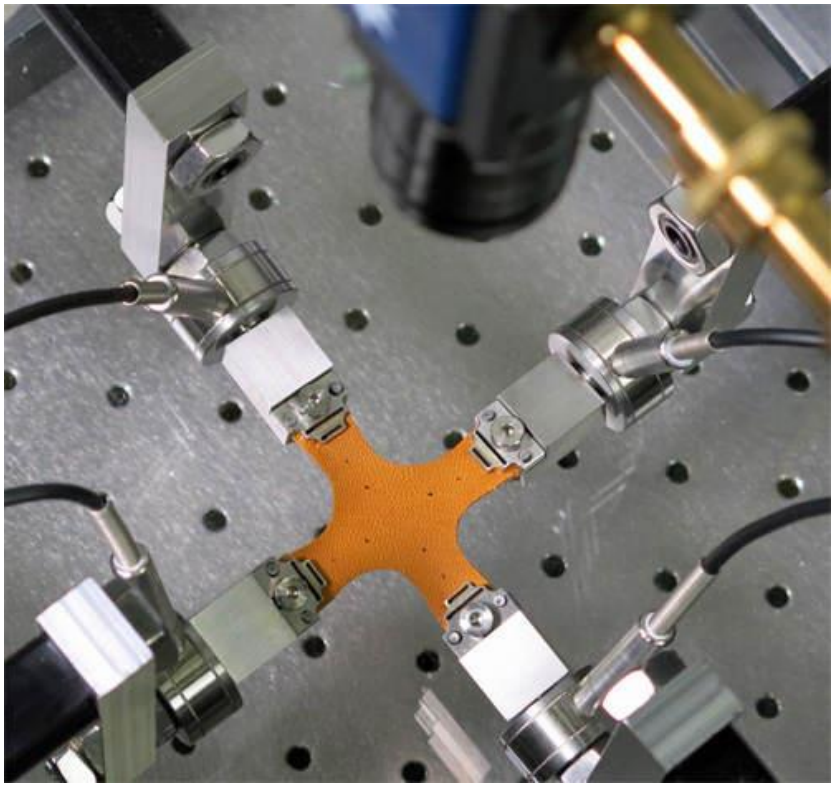
O ensaio de tração é um dos testes mais utilizados para avaliar os mais diversos materiais presentes no mercado, isso porque este teste fornece dados que podem quantificar várias propriedades mecânicas importantes, entre elas: módulo de elasticidade, tensão de escoamento, tensão de ruptura, alongamento, estricção, entre outras propriedades.

Um problema identificado nesta aplicação do ensaio de tração (uniaxial) é quando queremos estudar as características de materiais heterogêneos e anisotrópicos. Quando estes materiais são submetidos a esforços em diferentes direções, podem apresentar respostas distintas do que foi previamente projetado. Isto ocorre, pois o ensaio de tração uniaxial apresenta resultados em apenas uma direção do material estudado. Neste caso, para determinar de forma confiável as características destes materiais, faz necessário o ensaio de tração biaxial.

O ensaio de tração biaxial aplica um estado de tensão controlado de estresse e deformação ao corpo de provas em duas direções diferentes para ajudar a caracterizar o seu comportamento anisotrópico. Os dados produzidos fornecem informações para a modelagem constitutiva de materiais e permitem aos pesquisadores comparar diferentes materiais. Eles podem ajudar a avaliar a anisotropia, as relações não lineares de tensão-deformação e a viscoelasticidade. Os sistemas biaxiais planos podem ser configurados para aplicações de teste estático, dinâmico e de fadiga.

Quatro garras prendem o corpo de prova ao atuador da máquina, como representado na Figura 7. Esta configuração permite a determinação das propriedades mecânicas de um material quando este é submetido a uma carga de esforços multiaxiais durante sua vida útil.

Figura 7 - Representação de um ensaio de tração biaxial

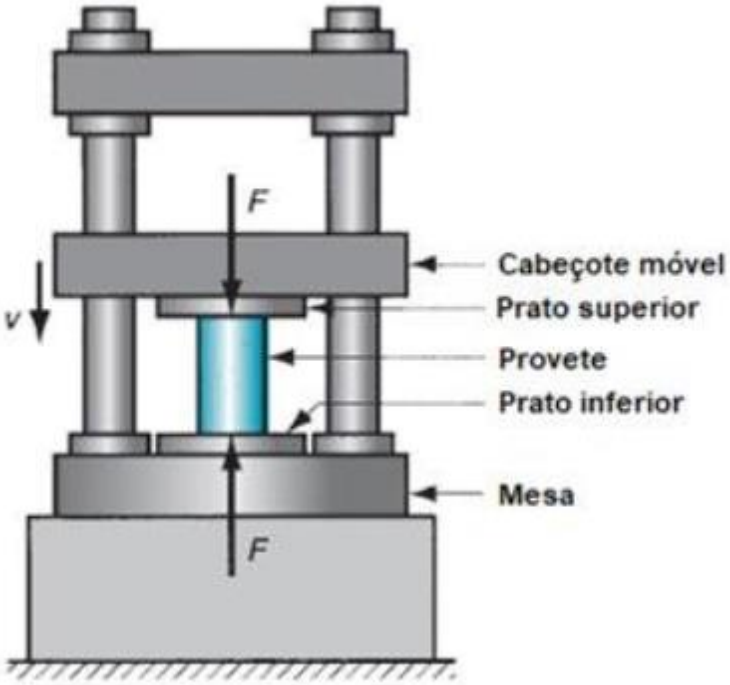


Fonte: TestResources, 2020

1.2.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO

O Ensaio de compressão pode ser um ensaio destrutivo ou não, muito utilizado pelas indústrias para conhecermos propriedades mecânicas de um material a ser estudado. Consiste em uma aplicação de uma força uniaxial compressiva em um corpo de prova até que ele deforme ou chegue no seu limite. O ensaio de compressão, representado na Figura 8, é utilizado para medirmos a força para deformar por compressão um corpo de prova

Figura 8 - Representação do ensaio de compressão



Fonte: Researchgate, January 2010

Nos ensaios de compressão os corpos de provas podem comportar-se de formas diferentes. Caso o material seja dúctil, ou seja, ele tem a capacidade de sofrer uma certa deformação permanente antes de chegar no seu ponto de ruptura, o ensaio irá provocar uma deformação lateral. Geralmente essa deformação ocorre até que o material chegue em um estado de disco, sem que ocorra o rompimento. O ensaio de compressão em materiais dúcteis fornece apenas as propriedades mecânicas em relação a zona elástica.

Nos ensaios de compressão em materiais frágeis, ou seja, o material não tem a capacidade de deformação permanente antes da sua ruptura, a fase elástica do material é muito pequena, e por isso é muito difícil determinarmos as propriedades em relação a essa fase. A propriedade medida é o limite de resistência a tração, mede-se também a dilatação transversal e longitudinal do corpo de prova.

Assim como no ensaio de tração, o teste de compressão tem sua deformação elástica e em seguida a fase plástica. Na sua fase elástica, o corpo volta ao seu estado inicial após a retirada da carga e podemos utilizar a lei de Hooke para descobrirmos as características do material. A maior diferença é dada na deformação plástica, o corpo retém uma deformação residual logo depois que é retirada a carga.

1.2.3.1 LIMITAÇÕES DO ENSAIO

Primeira limitação do ensaio de compressão é o comprimento do corpo de prova, pois ele tem que obedecer a uma relação da divisão do Comprimento (L) pelo Diâmetro (D) tem que ficar na faixa de 2 a 8. O corpo de prova não pode ser muito pequeno, pois o atrito nas superfícies de contato com a máquina de ensaio prejudicará a validade dos resultados.

Segunda limitação é a flambagem, é o fenômeno que ocorre em peças onde a área de seção transversal é pequena em relação ao seu comprimento, quando submetemos a um esforço axial. A flambagem ocorre porque a peça sofre flexão transversalmente devido a carga de compressão axial.

Terceira limitação é o atrito, seria força de contato entre as duas superfícies quando há tendência a movimentar-se. É gerada pela superfície áspera dos corpos paralela à superfície de interação e oposta ao movimento. O atrito pode causar a alteração da forma do corpo de prova, eles podem ficar abaulados ou ter o efeito barril. Para evitar o atrito entre a máquina e o material a ser ensaiado é colocado um lubrificante na superfície de contato e usinam-se sulcos rasos para reter melhor.

O ensaio de compressão é bastante útil para sabermos como o corpo de prova comporta-se quando está sendo comprimido por uma força uniaxial. Podemos também entender como suas propriedades irão reagir a determinadas situações. Ele possui algumas limitações que podem influenciar no resultado, mas tomando os cuidados com as variáveis não teremos problemas em executá-lo.

1.2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas, como citado anteriormente, podem ser determinadas através da análise do diagrama tensão-deformação. Sendo tensão definida como a resistência interna de um material a uma força externa aplicada sobre um corpo, por unidade de área. E deformação definida como a variação de uma dimensão qualquer desse corpo, por unidade da mesma dimensão, quando submetido a um esforço qualquer.

As propriedades mecânicas que podemos determinar através da análise do diagrama gerado no ensaio de tração são:

<u>Tensão Limite de Escoamento</u>**:** é a tensão a partir da qual o material entra no regime plástico de deformação, ou seja, o material a partir desse ponto não retorna ao seu estado inicial após ser liberado do esforço ao qual foi aplicado, apresentando deformação permanente.

Tensão Limite de Resistência**:** corresponde ao ponto máximo da curva. É a tensão máxima que pode ser suportada pelo material.

Tensão Limite de Ruptura**:** é a tensão máxima que o material suporta, ou seja, a aplicação de esforços superior a este valor provoca a fratura do material.

2 DESENVOLVIMENTO

Dado o contexto sobre a necessidade de uma máquina biaxial, o grupo definiu alguns pontos principais para iniciar o desenvolvimento deste equipamento para ensaios de tração. Entendendo que o equipamento necessita de um elemento de força, de medição e um corpo para ser estudado, nesta etapa o grupo fará a definição prévia do atuador, da célula de carga e o corpo de provas, mas posteriormente todos os elementos serão detalhados e inseridos no contexto macro do equipamento.

2.1 CORPO DE PROVA

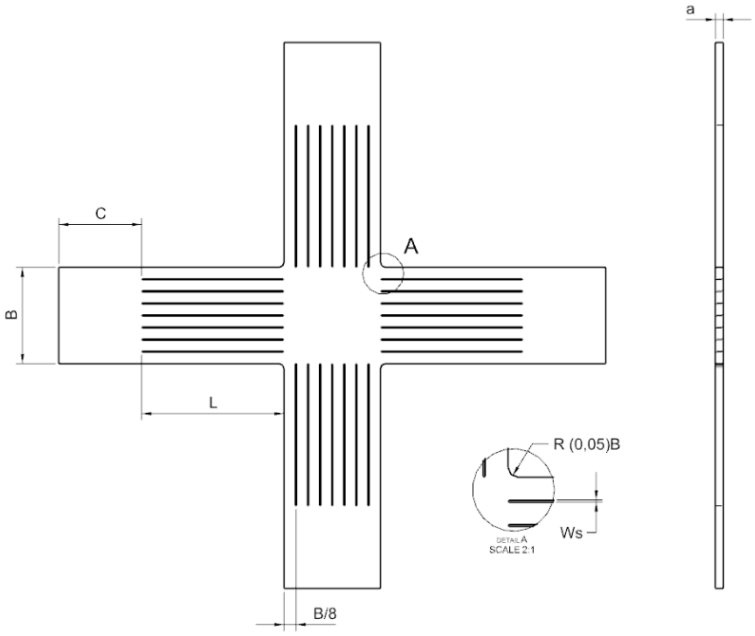
O corpo de prova é um elemento extremamente importante, pois além de usado no dimensionamento da nossa máquina, sua geometria é um fator que impacta fortemente nos resultados obtidos através dos ensaios.

A avaliação deste elemento para o ensaio de tração biaxial ocorre desde o século passado e há diversos estudos para entender qual melhor geometria possível, mas não serão discutidos detalhes sobre estes, pois em 2014 a Organização Internacional de Normalização estabeleceu a ISO 16842, que determina algumas cotas para o corpo de prova, além de estabelecer outras condições para o ensaio biaxial.

Embora a norma informe que este corpo de provas é para teste em materiais metálicos, o grupo entendeu que o *design* definido pela ISO foi estudado para chegar na melhor solução para o ensaio biaxial em geral e que a mudança de material não será muito afetada neste quesito, portanto, será usado este formato para estudo neste projeto. Apesar dessas considerações, posteriormente será feito um estudo através do método de elementos finitos para validar essa escolha.

Na Figura 9 temos o *design* do corpo de provas definido pela ISO e na figura seguinte, definido como padrão para o nosso equipamento. É importante estabelecer que esta é uma recomendação do grupo e pode ser alterada de acordo com a necessidade do ensaio, tendo em vista que a manufatura aditiva dispõe dos mais variados equipamentos com as mais variadas resoluções e materiais, as quais nem todas serão capazes de reproduzir a peça na dimensão proposta, além de que a versatilidade do equipamento permite a realização de outros testes além do teste de tração e consequentemente, a necessidade de outra geometria para o corpo de provas.

Figura 9 - *Design* proposto pela ISO 16842:2014

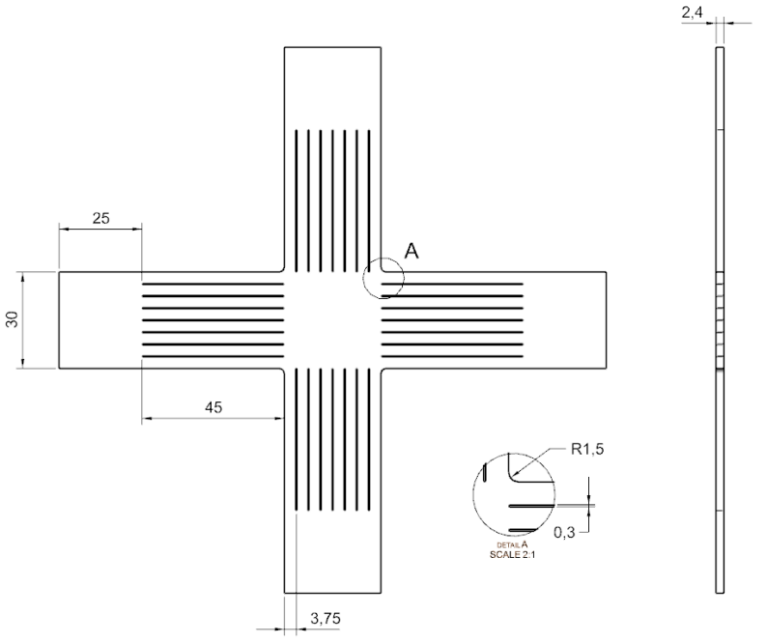


Fonte: Autores

Conforme visto na figura acima, o corpo de provas é cruciforme, possui ranhuras igualmente espaçadas e raios internos arredondados. Todas essas características visam obter uma tensão uniforme na área de interesse de estudo, região central do corpo de provas, minimizando os efeitos dos braços usados como fixação.

Conforme especificado pela ISO 16842:2014, a espessura (a) do corpo de provas deve ser a mesma recebida da laminação e a largura do braço (B) maior ou igual a 30mm, satisfazendo a condição $a \leq 0{,}08B$. Como o foco do projeto é para polímeros e manufatura aditiva, optou-se por B = 30 mm e, portanto, a = 2,4 mm. Conforme determinado pela norma, as outras cotas são baseadas em *B*, o corpo de provas ficará como apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Corpo de provas proposto



Fonte: Autores

2.2 DEFINIÇÃO PRÉVIA DA CAPACIDADE DO EQUIPAMENTO

Para a definição prévia da capacidade do equipamento, é necessário verificar quais as tensões necessárias para romper o material em estudo. Entendendo que o modelamento matemático para o ensaio biaxial em materiais anisotrópicos é muito complexo e que esta é uma etapa inicial do projeto, decidiu-se por simplificar e calcular este valor como se este fosse um ensaio de tração uniaxial em uma peça com área transversal totalmente preenchida, ou seja, sem os vazios gerados durante o processo de extrusão. Para isso, se faz necessário duas informações principais: a área transversal do corpo de provas e a tensão de ruptura do material. A área transversal (A_t) pode ser obtida facilmente multiplicando a cota "B" pela "a" do corpo de provas, resultando em $A_t = 72\ mm^2$.

Quanto a tensão de ruptura, isso depende do material que será ensaiado. Com base na pesquisa feita e nos dados da Figura 11, focou-se em desenvolver um equipamento que pudesse atender 95% dos materiais utilizados na manufatura aditiva, com isso, o grupo optou por utilizar como maior tensão de ruptura a do PEKK, que apresenta o valor médio de 110 MPa.

Figura 11 – Propriedade Mecânica dos polímeros da manufatura aditiva

Table 2
Rating of candidate matrix polymers for FFF printing (modified from Table S1 in [15]).

Polymer	Extrudability	Printability	Mechanical properties	Printing temperature (°C)	Ultimate Tensile Strength* (MPa)
PLA	+/−	+ +	−	190–210	37–46
ABS	+ +	+ +	+	210–250	22–37
Nylon	+	+/−	+	235–260	34–68
PS/HIPS	+ +	+	+/−	240	20–42
PETG	+	+ +	+/−	230–250	41–53
PBT	+	+	+	220–250	39–60
PBS	+	+/−	+	120–140	19–34
PC	+ +	+/−	+ +	275–285	57–72
PMMA	+	−	+	180–250	52–70
HDPE	+	+/−	+	120–150	11–45
PP	+	+/−	+	130–170	9–80
PVC	+/−	+/−	+ +	200–300	1–59
TPU	+/−	+	+	210–225	6–33
PEI	+ +	+	+ +	350–390	69–81
PEEK	+ +	+	+ +	360–450	48–265
PPSF	+ +	+	+/−	350	55
PEKK	+ +	+	+ +	350	90–110

* Tensile strength data are collected from multiple sources including materials datasheets and publications.

Fonte: Recent developments in polymers/polymer nanocomposites for additive manufacturing, Science Direct Website, June 2020.

Com essa informação e $\sigma = 1{,}2\ .\frac{F}{A_t}$, a força obtida foi de $F = 9{,}5\ kN$. O valor de 1,2 da equação representa um coeficiente de segurança de 20%, deixando uma margem para aprimoramento na assertividade das informações. Para o nosso projeto será utilizado 2 atuadores por eixo, portanto, os atuadores deverão ter capacidade mínima de 4,75 kN.

2.3 ATUADORES

Para escolher os atuadores a serem utilizados, o grupo fez uso da “Matriz de Decisão”. Essa ferramenta ajuda na tomada de decisão, pois permite analisar as melhores possibilidades, considerando os elementos mais relevantes. Dessa forma, foi possível utilizar critérios de avaliação, atribuindo pesos para cada um deles. Os itens avaliados foram os atuadores eletromecânicos, servo-hidráulicos e motores de passo, e os critérios foram: precisão, custo e manutenção. Resultando nas informações expressas na Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz de Decisão

	Eletromecânico	Servo Motor Hidráulico	Sistema com Motor de Passo	Prioridade Relativa
Precisão	5	3	4	0,67
Custo	3	1	5	0,11
Manutenção	4	1	3	0,22
Total	**4,56**	**2,34**	**3,89**	**1**

Fonte: Autores

Pela análise realizada, a conclusão foi de que a melhor escolha seria o atuador eletromecânico.

Os atuadores eletromecânicos são de fácil usabilidade em comparação aos motores de passo, pois o sistema vem pronto para instalação e operação, tendo como vantagem o baixo esforço de montagem, e sua precisão possibilita realizar o ensaio com carregamento de tração e compressão de forma quase estática. Seu funcionamento é baseado em um fuso de esfera que transforma um torque do motor com alto rendimento em um movimento linear garantindo uma alta precisão e um alto desempenho.

Para selecionar o modelo a ser utilizado máquina em questão, foram levados em conta quatro parâmetros: carga (força de processo, dimensões, tempo de funcionamento etc.), dinâmica (aceleração, velocidade, tempo de ciclo etc.), geometria (local de instalação, comprimento do percurso etc.) e condições de instalação (posição de instalação, fixação, gruas de liberdade, vibrações e impactos etc.). Com essa junção de informações, pelo catálogo da Bosch Rexroth, o modelo escolhido foi o EMC-050-NN2 fuso 20x10 mm e motor MSM031C, conforme Tabela 2:

Tabela 2 – Dados técnicos do atuador

Dados técnicos

Dados de acionamento em montagem do motor através de flange e acoplamento

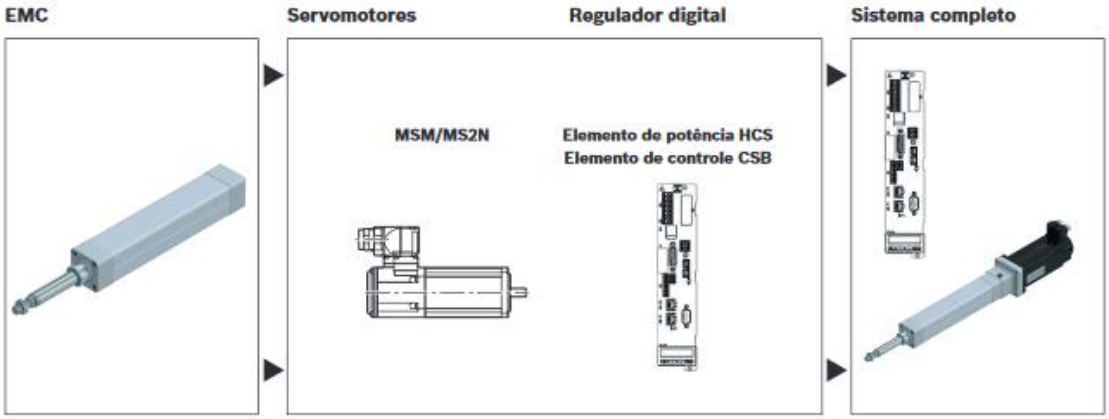
EMC	d_0 x P (mm)	para motor	Flange e acoplamento $F_{máx}$ 2) (N)	M_p 2) (Nm)	$v_{máx}$ 2) (m/s)	M_{Rs} (Nm)	$k_{J\ fix}$ 1)	$k_{J\ var}$ 1)	$k_{J\ m}$ 1)	m_{fc} (kg)	$a_{máx}$ (m/s²)
32	12 x 5	MSM019B MSM031B MS2N03B	1 200	1,1	0,57	0,16	8,945	0,012	0,633	0,37	
	12 x 10	MSM019B MSM031B MS2N03B	750	1,3	1,13	0,20	9,618	0,013	2,533	0,37	
40	16 x 5	MSM031C MS2N03B MS2N03D	4 500	4,0	0,38	0,28	41,616	0,032	0,633	0,56	50,0
		MS2N04								0,68	
	16 x 10	MSM031C MS2N03B MS2N03D	3 000	5,3	0,77	0,33	42,839	0,033	2,533	0,56	
		MS2N04								0,68	
	16 x 16	MSM031C MS2N03B MS2N03D	2 000	5,7	1,23	0,40	46,114	0,040	6,485	0,56	
		MS2N04								0,68	
50	20 x 5	MSM031C MSM041B MS2N04	7 800	6,9	0,32	0,50	78,815	0,085	0,633	1,10	39,8
		MS2N05								1,13	
	20 x 10	MSM031C MSM041B MS2N04	5 500	9,7	0,63	0,55	82,092	0,088	2,533	1,10	50,0
		MS2N05								1,13	
	20 x 20	MSM031C MSM041B MS2N04	3 200	11,3	1,27	0,65	90,304	0,095	10,132	1,10	
		MS2N05								1,13	
63	25 x 5	MSM041B MS2N05	15 900	14,1	0,28	0,75	249,693	0,223	0,633	1,77	28,9
		MS2N04					103,693			1,28	
		MS2N06					249,693			1,97	
	25 x 10	MSM041B MS2N05	14 800	26,2	0,55	0,80	258,227	0,243	2,533	1,77	50,0
		MS2N04	10 700	18,9			112,227			1,28	
		MS2N06	14 800	26,2			258,227			1,97	
	25 x 25	MSM041B MS2N05	8 000	35,4	1,38	1,00	286,002	0,242	15,831	1,77	
		MS2N04	4 300	19,0			140,002			1,28	
		MS2N06	8 000	35,4			286,002			1,97	

Fonte: Catálogo da Bosch: Electromechanical Cylinders EMC, 2018

É importante ressaltar que esta foi a definição inicial do projeto e que após as verificações pelo método de elementos finitos, o grupo precisou alterar o atuador para a versão com fuso de 20x5 mm.

Foi decidido pelo grupo utilizar a combinação motor-regulador, pois dessa o grupo teria o fornecimento de um motor completo com aparelho de regulagem e controle. O sistema eletrônico de controle e servomotor em uma unidade compacta é uma solução que permite flexibilidade e economia de espaço. O sistema completo está expresso na Figura 12.

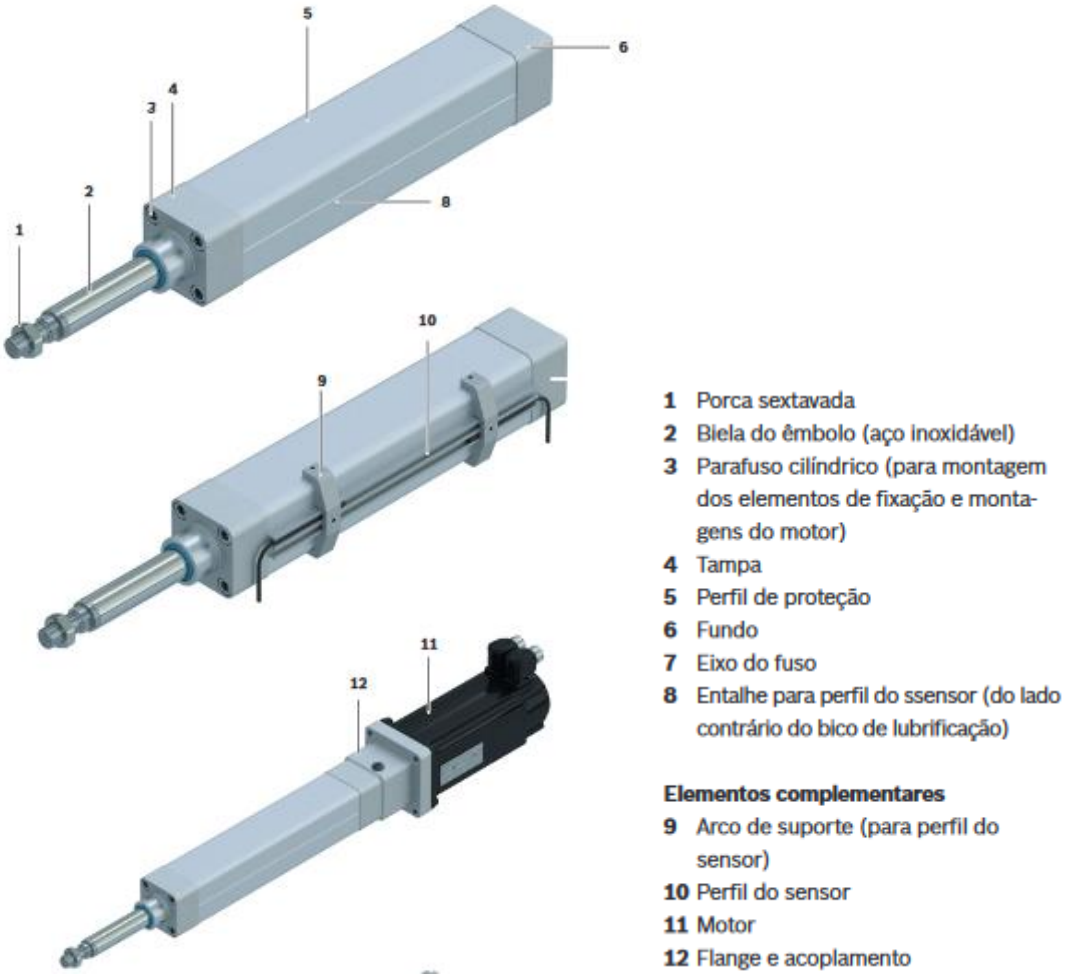
Figura 12 – Sistema completo Motor – Regulador



Fonte: Catálogo da Bosch: Electromechanical Cylinders EMC, 2018

Na Figura 13 é possível observar melhor os itens que compões a montagem do conjunto.

Figura 13 - Elementos de construção do atuador

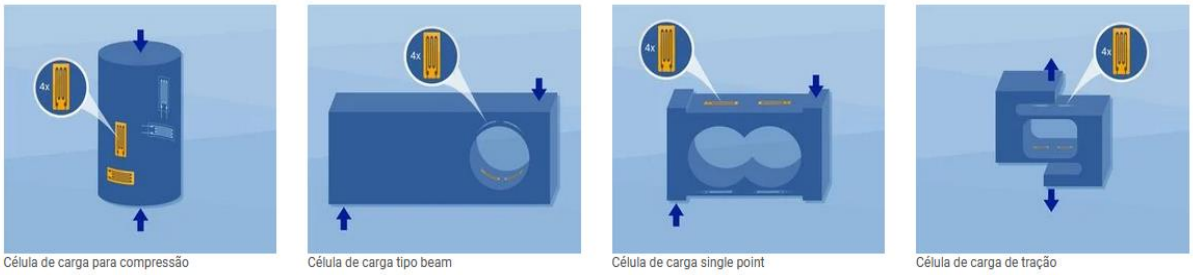


Fonte: Catálogo da Bosch: Electromechanical Cylinders EMC, 2018

2.4 SENSORES

Células de carga são equipamentos que medem a força exercida sobre ela. Para isso, extensômetros são colados em pontos estratégicos que possam gerar o máximo de deformação possível para medir suas respectivas micro deformações. Elas geram uma variação na resistência, atribuída pelo seu material formador devido ao aumento e diminuição do tamanho do resistor do extensômetro. Essa variação é então interpretada e utilizada para determinar a força exercida sobre o equipamento. Na Figura 14 temos exemplos desse dispositivo.

Figura 14 – Tipo de Célula de Carga



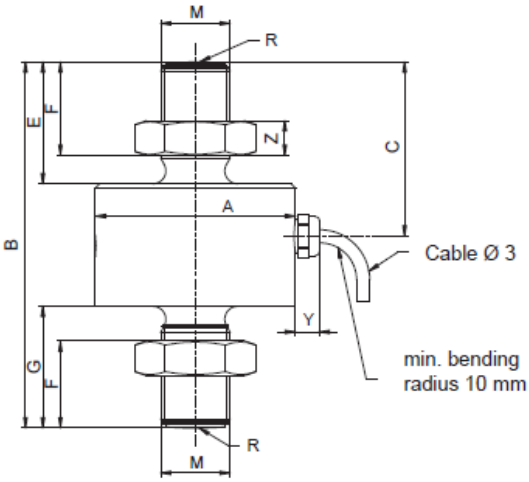
Fonte: Como Uma Célula De Carga Trabalha HBM, 2021

Para a seleção dos sensores de esforço exercido sobre os corpos de prova foi levado em consideração a precisão proporcionada por ele, além de sua melhor instalação no sistema como um todo. Foi selecionado o sensor que tivesse a capacidade de medir esforços de tração e compressão de maior precisão independente do sistema de fixação. Para isso foi escolhida a célula de carga U9C da empresa HBM, ilustrada na Figura 15, que melhor se adequava aos objetivos buscados. Ela é uma célula de carga de tamanho reduzido que, por isso, se encaixa bem ao sistema sem aumentar muito o tamanho de cada braço e o diâmetro correspondente, na Figura 16 e Figura 17 pode-se encontrar mais detalhes sobre as dimensões. Serão utilizadas 4 células de carga de carga nominal de 10 kN com fixação por rosca M10, que será posteriormente ajustado ao equipamento, mais informações podem ser vistas na Figura 18 e Figura 19.

Figura 15 - Célula de Carga U9C

Fonte: Célula de Carga U9C HBM, 2021

Figura 16 - Dimensões da célula de carga



Fonte: Célula de Carga U9C HBM, 2021

Figura 17 – Cotas da Célula de Carga U9C

Nominal (rated) force of the U9C	$A_{-0.1}$	B	C	E	F	G	M	R	Y	Z
	[mm]									
0.5 kN to 1 kN	26	44.5	20.5	13	9.5	13.5	M5	20	approx. 5.5	2.7
2 kN to 20 kN	26	60	28.5	21	16	21	M10	40	approx. 5.5	5
50 kN	46	84	40	28	21.5	28	M16 x 1.5	80	approx. 5.5	8

Fonte: https://www.hbm.com/pt/3926/celula-de-carga-u9c-para-forcas-de-tracao-e-compressao/

Figura 18 - Propriedades da célula de carga

Nominal (rated) force	F_{nom}	N	50	100	200							
		kN				0.5	1	2	5	10	20	50
Accuracy												
Accuracy class			0.2									
Relative reproducibility and repeatability errors without rotation	b_{rg}	%	< 0.2									
Relative reversibility error	$v_{0.5}$	%	< 0.2									
Non-linearity	d_{lin}	%	< 0.2									
Relative creep (30 min)	$d_{cr,F}$	%	< 0.2			< 0.1						
Effect of the bending moment at 10% F_{nom} * 10 mm (typical)	d_{Mb}	%	0.055		0.045	2.35					2.45	0.5
Effect of temperature on sensitivity												
in the nominal (rated) temperature range	TK_C	% / 10 K	0.2									
in the operating temperature range	TK_C	% / 10 K	< 0.5									
Effect of temperature on the zero signal												
in the nominal (rated) temperature range	TK_0	% / 10 K	< 0.2									
in the operating temperature range	TK_0	% / 10 K	< 0.50									
Electrical characteristics												
Nominal (rated) sensitivity	C_{nom}	mV/V	1									
Relative zero signal error	$d_{s,0}$	mV/V	+/- 0.2									
Sensitivity error	d_c	%	< +/-1 tensile , < +/-2 compressive									
Tensile/compressive sensitivity variation	d_{zd}	%	< 2									
Input resistance	R_i	Ω	250 - 400			300 - 450						
Output resistance	R_o	Ω	200 - 400			145 - 450						
Insulation resistance	R_{is}	Ω	> 1*10 ^{9}									
Operating range of the excitation voltage	$B_{u,gt}$	V	0.5 - 12									
Reference excitation voltage	U_{ref}	V	5									
Connection			4-wire circuit									
Temperature												
Reference temperature	t_{ref}	°C	23									
Nominal (rated) temperature range	$B_{t,nom}$	°C	-10 to +70									
Operating temperature range	$B_{t,g}$	°C	-30 to +85									
Storage temperature range	$B_{t,S}$	°C	-30 to +85									
Characteristic mechanical quantities												
Max. operating force	F_G	% of F_{nom}	200			150						
Limit force	F_L	% of F_{nom}	> 200			> 150						
Breaking force	F_B	% of F_{nom}	> 400									
Limit torque		Nm	1.7	3.4	2.5	3.7	4.5	28	23	11	11	35
Limit bending moment when loading with nominal (rated) force		Nm	0.17	0.7	1.5	3.7	3.8	10.2	14.4	8.2	8.6	28.5
Static lateral limit force when loading with nominal (rated) force 2)	F_q	% of F_{nom}	100				50	100	50	18	6	8
Nominal (rated) displacement		mm	0.008			0.018			0.03	0.05	0.09	0.14
Fundamental resonance frequency		kHz	6.5	9.1	12.6	15.3	15.9	13.2	14.5	14.6	14.6	7.2
Relative oscillation width		% of F_{nom}	70			80						70

Fonte: Célula de Carga U9C HBM, 2021

Figura 19 - Mais propriedades da célula de carga

Nominal (rated) force	F_{nom}	N	50	100	200							
		kN				0.5	1	2	5	10	20	50
Maximum impact load to ICE 60068-2-6												
Number			1,000									
Duration		ms	3									
Acceleration		m/s^2	1,000									
Vibrational stress to IEC 60068-2-27												
Frequency range		Hz	5 … 65									
Duration		min	30									
Acceleration		m/s^2	150									
General information												
Degree of protection per EN 60529 1)			IP67									
Spring element material			Steel									
Potting material			Silicone									
Cables			Four-wire circuit, PUR insulation									
Cable length		m	1.5, 3, 7, 12									
Weight		g	75			100						400

Fonte: Célula de Carga U9C HBM, 2021

Novamente, vale lembrar que esta foi a definição inicial do projeto e que com a alteração do atuador para outro com capacidade maior, foi necessário alterar a célula de carga para a versão que suporta carga nominal de 20 kN.

3 DETALHES DO EQUIPAMENTO

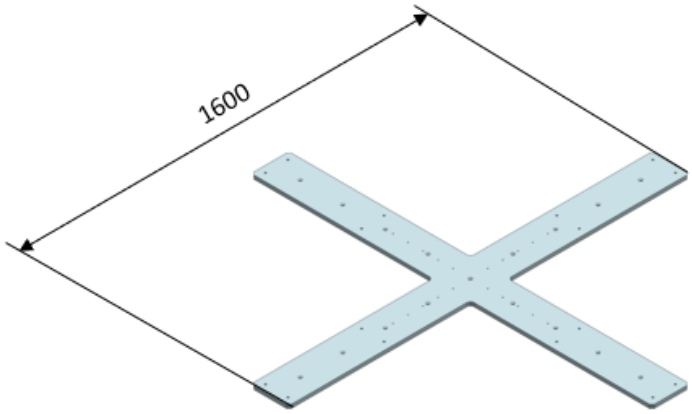
O layout do equipamento foi baseado em diversas máquinas disponíveis no mercado, otimizando o formato e materiais para a aplicação em polímeros. Abaixo estão apresentados todos os itens que compõe o equipamento e em seguida, serão indicadas as otimizações realizadas. A montagem e itens comerciais serão descritos detalhadamente nos desenhos de fabricação anexos.

O layout inicial consiste em uma chapa em formato de cruz sobre uma estrutura de perfis de alumínio. Os atuadores são parafusados diretamente na chapa, na ponta de sua haste é fixa a célula de carga, que por sua vez é rosqueada a um sistema de “morsa” onde o corpo de prova será fixado. O sistema de fixação será apoiado em uma guia linear para minimizar os esforços no eixo do atuador.

3.1 COMPONENTES DA MÁQUINA

A chapa em cruz será em aço ABNT 1045 e possui espessura de 10 mm e 1600 mm em sua medida maior. O desenho detalhado desse componente se encontra nos anexos. Na Figura 20, está ilustrado o máximo comprimento.

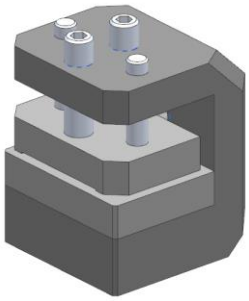
Figura 20 – Chapa em “cruz”



Fonte: Autores

O sistema de fixação é composto por 3 itens: um em formato “C”, no qual será fixo o mordente inferior e onde os pinos de guia que serão fixos por interferência no mordente superior serão guiados. O mordente superior tem um rebaixo para facilitar o alinhamento do corpo de prova e sua fixação se deve a dois parafusos Allen sem cabeça onde será feito o torque de aperto.

Figura 21 – Sistema de fixação tipo “Morsa”

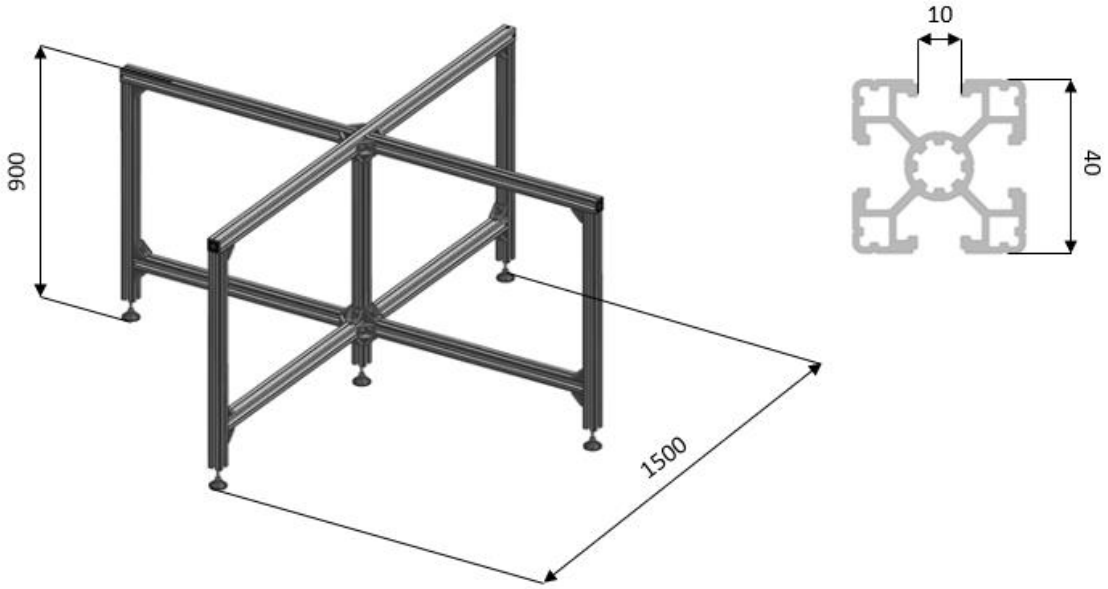


Fonte: Autores

A estrutura em perfis de alumínio tem altura de aproximadamente 900 mm e 1500 mm em sua medida maior, composta de perfis 40x40 com slot de 10 mm, cantoneiras para fixação dos perfis e pés de nivelamento, conforme Figura 22.

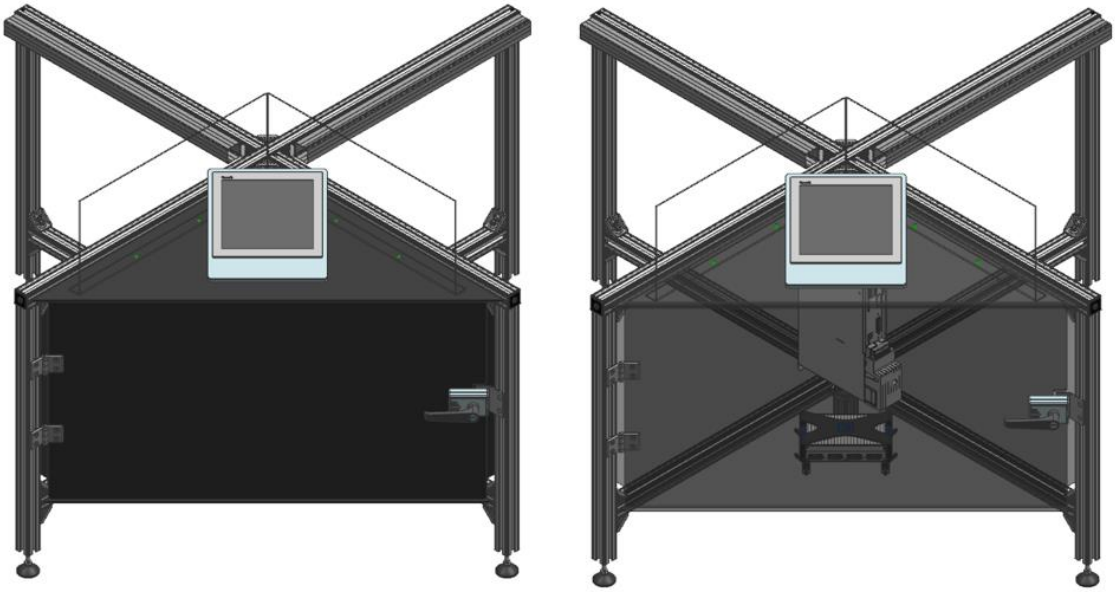
Em um quadrante da estrutura, utilizando suporte de chapa para slot de 10 mm dos perfis e chapas de 6 mm de espessura, foi feito um compartimento onde serão fixados os itens elétricos/eletrônicos. Na chapa superior do compartimento será fixada a IHM e placas de acrílico para proteção com altura de 250 mm, ilustrado na Figura 23. Nos quadrantes restantes que não estão em contato direto com o compartimento foi adicionado um duto para passagem de cabo.

Figura 22 – Estrutura em alumínio e perfil escolhido



Fonte: Autores

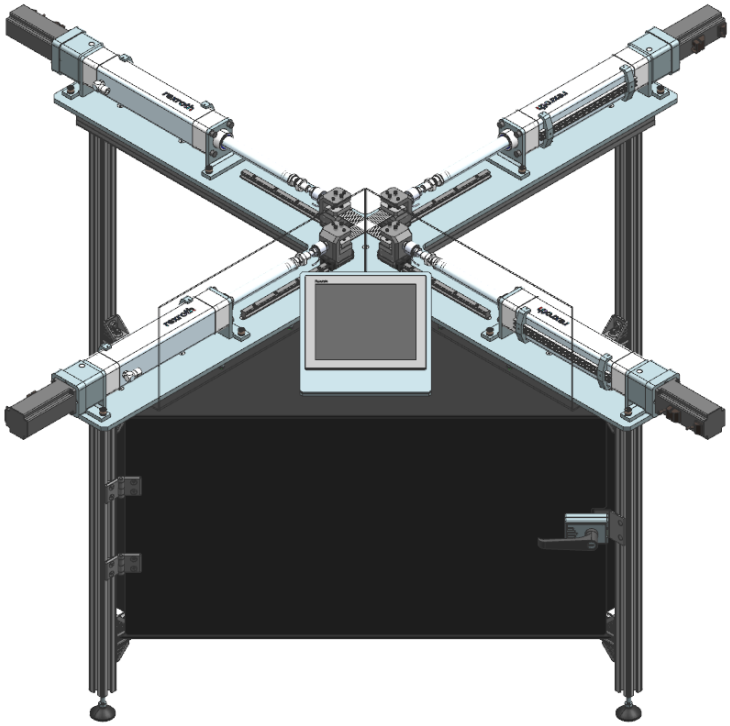
Figura 23 – Compartimentos dos componentes elétricos, suporte da IHM e proteção



Fonte: Autores

Na Figura 24, pode-se visualizar o layout final da máquina.

Figura 24 - Vista isométrica da última revisão



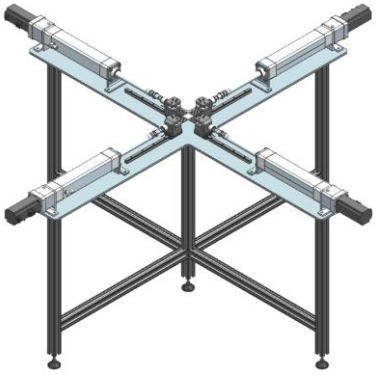
Fonte: Autores

3.2 OTIMIZAÇÕES

Durante o processo de desenvolvimento, foram realizadas otimizações de acordo com estudos efetuados pelo próprio grupo e com as análises dos professores, que auxiliaram no processo. A seguir, estão presentes as revisões da máquina, bem como as alterações de cada versão.

Na primeira revisão da máquina, apresentada na 1ª prévia, ilustrada na Figura 25, a estrutura tinha altura de 750 mm, a chapa tinha espessura de 15 mm e continha itens de fixação apenas na morsa. Além disso, faltava refino no modelo 3D como a furação da chapa, cantoneiras na estrutura e o sistema de controle da máquina ainda não tinha sido selecionado.

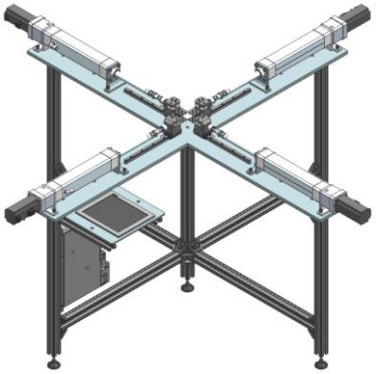
Figura 25 – Vista isométrica da máquina revisão 1



Fonte: Autores

Na segunda revisão da máquina, apresentada na 2ª prévia, como mostra a Figura 26, a altura da estrutura foi ajustada para 900 mm para melhorar a ergonomia do equipamento. Foi feito a furação na chapa, adicionado itens de fixação, cantoneiras na estrutura e o sistema de controle da máquina foi fixado diretamente nos perfis.

Figura 26 - Vista isométrica da máquina revisão 2



Fonte: Autores

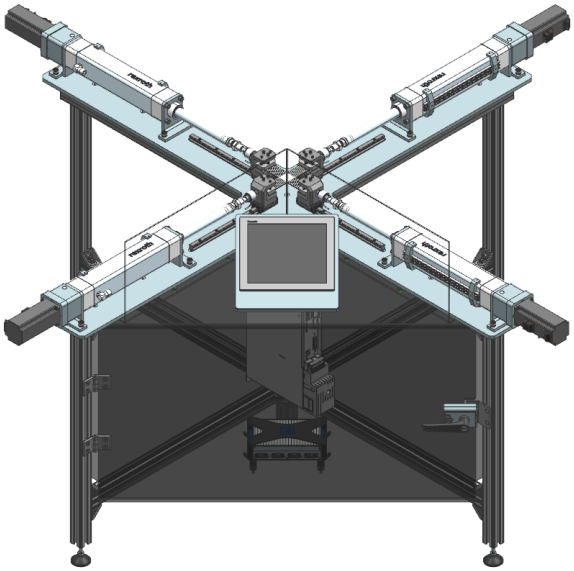
Na terceira e última revisão da máquina, expressa na Figura 27, durante o processo de simulação foi constatado que a espessura da chapa poderia ser reduzida para 10 mm com diferença ínfima na resistência, diminuindo aproximadamente 22 Kg do equipamento.

Outra observação durante a simulação, foi a necessidade de um novo modelo de atuador com mais força para romper o corpo de prova nos itens poliméricos de maior resistência entre os materiais estipulados.

Inicialmente o projeto previa a utilização de atuadores EMC-050-NN2 fuso 20x10 (carga máxima de 5,5 kN) e com esta necessidade, foi alterado para o mesmo modelo com o fuso 20x5 (carga máxima de 7,8 kN). O mesmo ocorreu para as células de carga U9C, alteradas do modelo com capacidade de 10 kN para a versão que suporta 20 kN.

Para isolar a parte elétrica, foi feito um compartimento fechado em um dos quadrantes, adicionado duto para passagem de cabo, um suporte para a IHM com ângulo de 30° para melhorar a ergonomia e uma proteção em acrílico transparente de 250 mm de altura.

Figura 27 – Vista isométrica da última revisão com transparência no compartimento



Fonte: Autores

4 SIMULAÇÕES

Neste capítulo, serão apresentadas as validações feitas através do método de elementos finitos com auxílio do *software* Ansys Workbench 2019 R3 – Academic, cuja licença foi concedida temporariamente pelo Centro universitário FEI em parceria com o Ansys. Esta etapa é muito importante para avaliar se os esforços atuantes na estrutura causarão alguma fratura ou deformação plástica durante sua utilização. Para isso, esta etapa foi dividida em alguns tópicos, nos quais serão abordados todo o modelamento matemático e resultados.

Primeiramente, o grupo apresentará um pouco do *software* e suas funções, auxiliando na explicação do que foi feito em cada parte. Na sequência, será detalhado passo a passo todas as simulações executadas e seus resultados.

4.1 APRESENTAÇÃO DO ANSYS WORKBENCH 2019 R3 - ACADEMIC

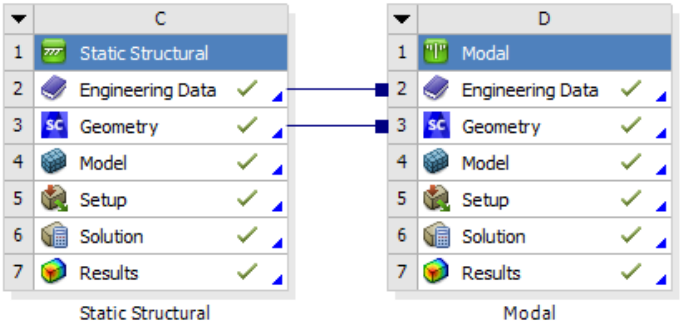
Ao executar o Ansys Workbench, são apresentadas as ferramentas da Figura 28. Para avaliação estrutural do projeto o grupo utilizará duas delas, a *Static Structural* (Estática Estrutural) e *Modal* (Análise Modal). Como o próprio nome sugere, a análise estática estrutural fornecerá informações como deformação e tensões, já a segunda, apresentará os modos de vibração para o equipamento.

Figura 28 - Ferramentas Workbench Ansys 2019 R3

Fonte: Autores

Em ambos os casos é necessário inserir algumas informações básicas para conseguir executar a simulação. Seguindo a ordem da Figura 29, o primeiro passo é a definição da geometria, que pode ser importada em alguma extensão para desenho 3D ou em alguns casos, desenhada no próprio *software*. Na sequência, será definido o modelamento e por fim já é possível obter todos os resultados necessários.

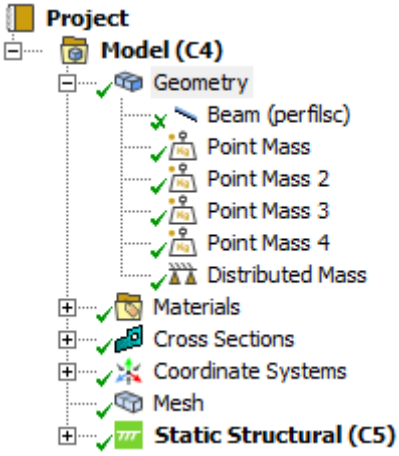
Figura 29 - Análise Estática Estrutural e Modal



Fonte: Autores

Para exemplificar, utilizou-se o caso da simulação dos perfis de alumínio que será detalhada no decorrer do projeto. Para esta simulação, foi feito o uso de elementos 1D desenhados diretamente no SpaceClaim, ferramenta disponível dentro do próprio Ansys, conforme mostra a Figura 30, e adicionados alguns pontos de massa e massa distribuída para representar o restante dos elementos que não estão presentes no desenho 1D. Embora tenha-se optado por usar o SpaceClaim nesse caso, para todos os outros será feito o uso do próprio desenho 3D usado na montagem do projeto.

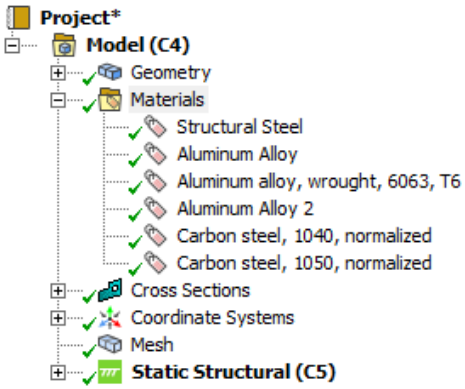
Figura 30 - Configurações de Geometria



Fonte: Autores

Na sequência, é necessário escolher o material que será usado no elemento ensaiado, pois em conjunto com a geometria definirá todas as propriedades mecânicas da peça analisada. Na Figura 31 pode ser visualizado alguns exemplos de materiais utilizados nas simulações, sendo todos eles extraídos direto da biblioteca do Ansys.

Figura 31 - Configurações de Material

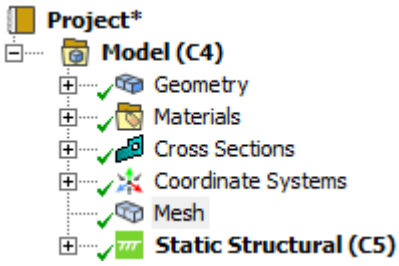


Fonte: Autores

Continuando, é apresentado também as informações de seção transversal e sistema de coordenadas. Neste caso, não foi alterada nenhuma das duas, pois ambas já são preenchidas conforme a geometria carregada e não houve necessidade de alteração.

Uma das partes mais importantes é a definição da malha, pois a quantidade de elementos e como eles estão dispostos no corpo ensaiado impactaram diretamente os resultados da simulação. Neste caso da estrutura de perfis que está sendo utilizado elementos 1D, não foi criada uma malha muito complexa, mas caso fosse necessária, há a possibilidade de refiná-la em áreas específicas ou determinar suas propriedades de forma independente para cada objeto. Como podemos ver na Figura 32.

Figura 32 - Configurações da Malha

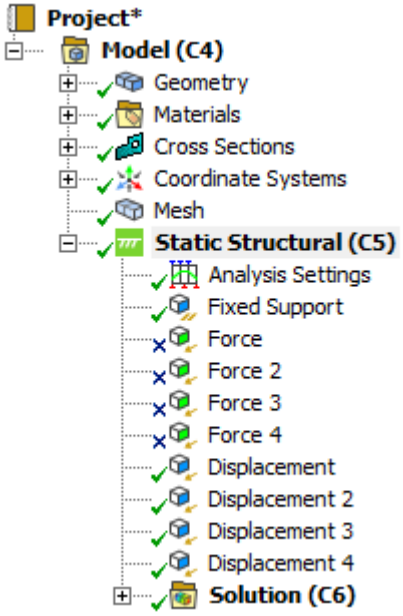


Fonte: Autores

As últimas ações necessárias são definir quais variáveis influenciam o corpo, como por exemplo, a inserção de um deslocamento prévio, força, momento e fixação deste no espaço. A Figura 33 traz como exemplo um corpo que possui suportes fixos (*Fixed Support*) e deslocamentos (*Displacement*) já definidos. É possível observar que há forças (*Force*) definidas também, mas elas foram ocultadas da simulação (conforme indicação do “x” ao lado esquerdo

do nome), pois a verificação com ela também foi feita, mas neste caso não está sendo utilizada mais no resultado, sendo uma boa alternativa para fazer várias análises sem precisar criar e deletar elementos com frequência.

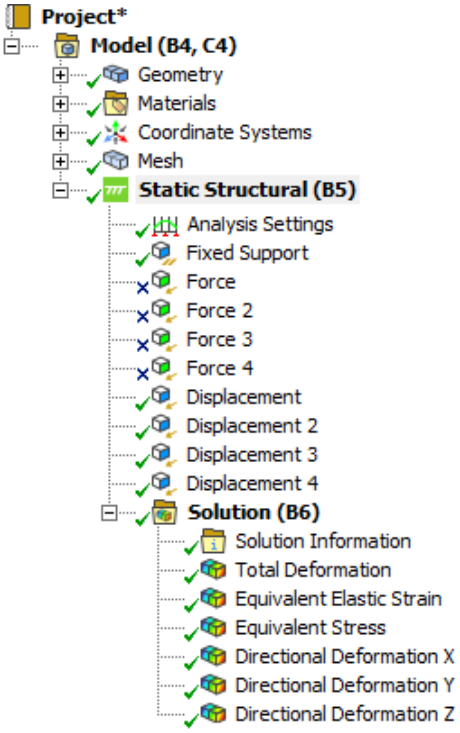
Figura 33 - Configurações de Variáveis



Fonte: Autores

Por fim, falta apenas escolher quais os resultados desejados da simulação, ou seja, com base em todos os dados inseridos, quais informações o software fornecerá como resposta. Nestas simulações os mais utilizados foram a avaliação das deformações totais e direcionais (*Total Deformation* e *Directional Deformation*) e tensão equivalente (*Equivalent Stress*), expressos na Figura 34.

Figura 34 - Configurações de Resultados



Fonte: Autores

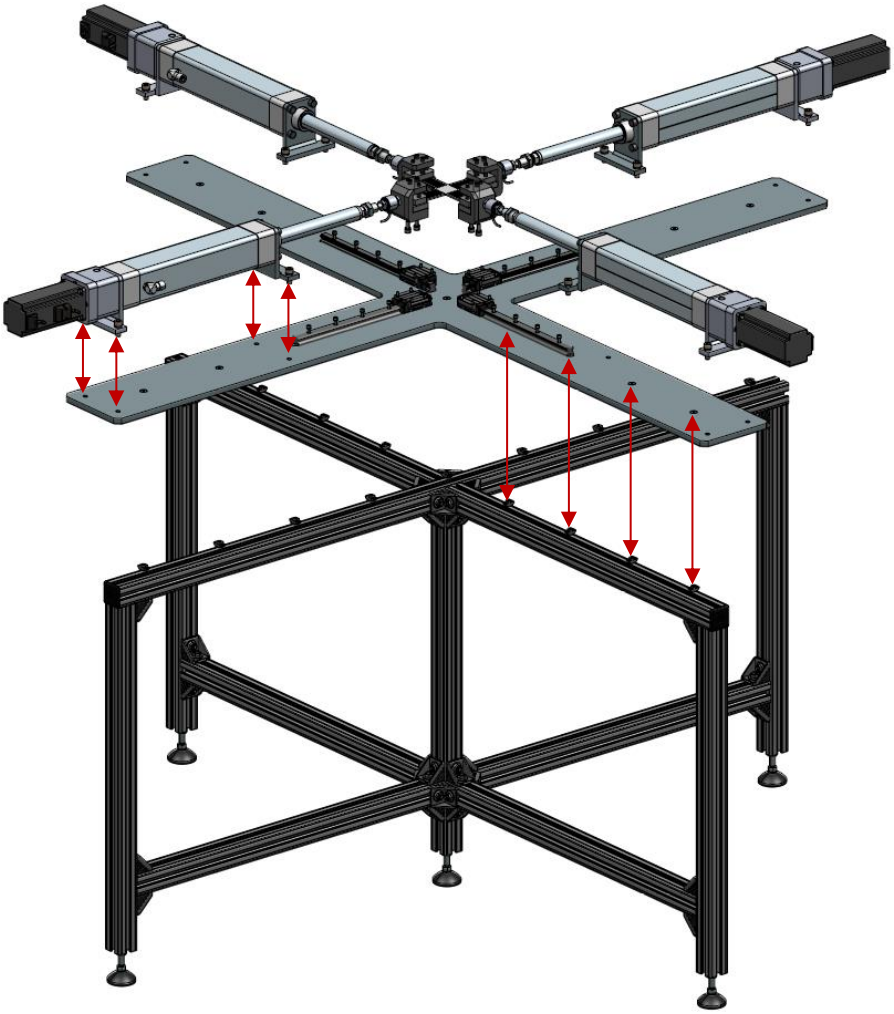
Com essas informações, foi possível seguir com a simulação para cada elemento.

4.2 ANÁLISE DA CHAPA EM CRUZ

O primeiro passo para começar a simulação é entender como o modelamento matemático será feito e para isso, é necessário analisar a montagem equipamento em si. Na Figura 35, em vista explodida e sem o armário que armazena os componentes de controle, é visto que cada atuador é fixado na chapa em cruz por 4 parafusos e na qual cada um de seus braços está fixo na estrutura de perfis metálicos por porcas T. A ideia inicial do grupo era simular toda a estrutura de perfis com a chapa, mas logo no início esta estratégia foi descartada, devido à complexidade dos perfis e o tamanho da estrutura.

Quanto maior a complexidade e tamanho dos objetos, demanda-se mais elementos e consequentemente, mais tempo para poder rodar as simulações, o que na escala deste equipamento tornaria a tarefa muito difícil. Independente disto, o Ansys oferece ferramentas que se equiparam a ideia inicial, ou seja, serão as selecionadas para a nossa análise sem grandes prejuízos de precisão.

Figura 35 - Vista Explodida do Equipamento (sem armário)



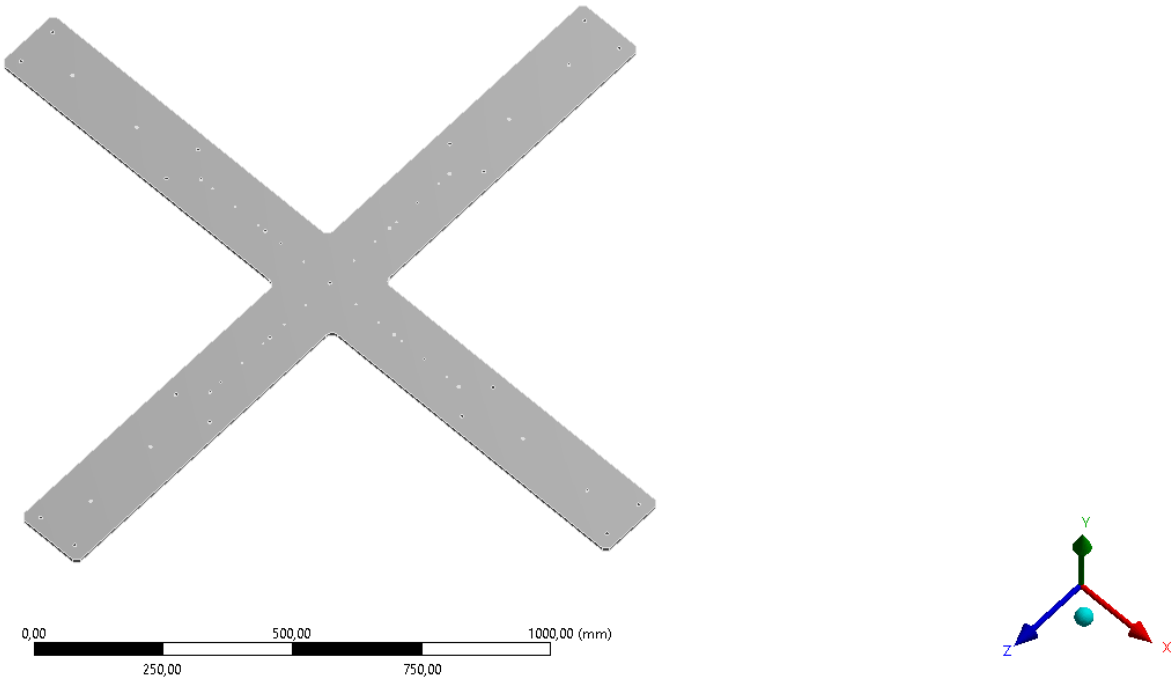
Fonte: Autores

Entendendo a figura acima e a montagem do equipamento previamente detalhada, sabemos que cada atuador é fixo na chapa em cruz através de 4 parafusos M8 classe 8.8 e que esta chapa está fixada nos perfis em 4 pontos ao longo de cada braço por porcas tipo T. Portanto, a análise foi dividida em 4 etapas, verificação de esforços na chapa em cruz, na estrutura dos perfis de alumínio, nos parafusos de fixação dos atuadores e por fim, no corpo de provas, sendo esta última para verificação das forças definidas para cada atuador.

4.2.1 ANÁLISE ESTÁTICA ESTRUTURAL DA CHAPA EM CRUZ

Começando pela chapa em cruz, serão avaliados 3 pontos principais: deformações, tensões e frequências naturais. Como primeiro passo, foi selecionada a análise estática estrutural e importada a geometria previamente desenhada em um *software* capaz de realizar desenhos 3D, conforme Figura 36.

Figura 36 - Geometria da Chapa em Cruz



Fonte: Autores

O projeto originalmente prevê o uso de um aço SAE 1045, mas este material não está disponível na biblioteca padrão do Ansys na versão disponibilizada, portanto, foi criado este material manualmente dentro do software, com base em suas propriedades mecânicas.

Já na definição da malha, demonstrada na Figura 37, entendendo que o foco da simulação é verificar a deformação deste corpo, optou-se por utilizar o método *Hex Dominant* sendo a malha *All Quad*, mais recomendada para este propósito.

Figura 37 - Dados da Malha Hex Dominant

Details of "Hex Dominant Method" - Method

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Method	Hex Dominant
Element Order	Use Global Setting
Free Face Mesh Type	All Quad
Control Messages	Yes, Click To Display...

Fonte: Autores

Além disso, foi utilizado o refino de malha nas áreas de fixação dos atuadores para obter uma representação mais real e detalhada na área de interesse.

Por fim, foi determinado que os elementos tenham no máximo 5mm, o que resultou em aproximadamente 210 mil elementos, apresentados na Figura 38. É importante ressaltar que esses dados foram para a última simulação, pois o grupo começou com elementos maiores e fomos refinando até chegar em um ponto ótimo entre resultado e tempo de simulação.

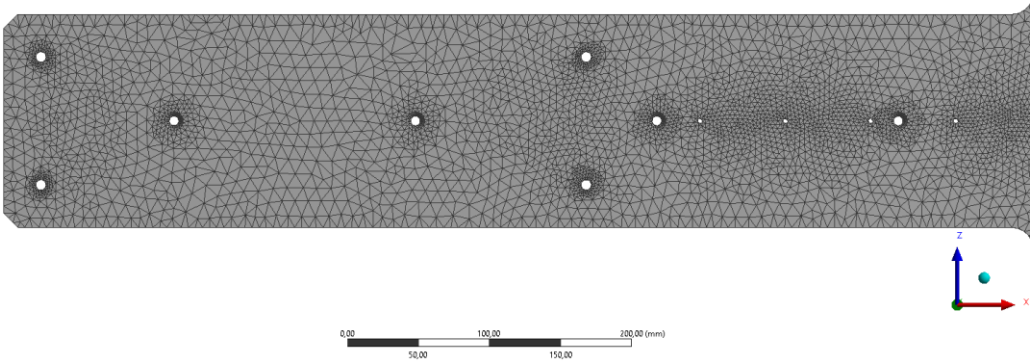
Figura 38 - Dados Gerais da Malha

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	5, mm
Sizing	
Quality	
Inflation	
Advanced	
Statistics	
Nodes	356281
Elements	207642

Fonte: Autores

Devido ao número elevado de elementos, não é possível apresentar uma imagem ampla da peça com a malha, pois os pontos acabam combinando-se na representação e virando uma figura só. Por isso, é apresentado na Figura 39 apenas um braço da peça.

Figura 39 - Malha Final em um "braço" da chapa em cruz



Fonte: Autores

Devida a importância da verificação estrutural, foram feitas duas simulações diferentes nesta chapa e, portanto, dois setups diferentes para fixação e esforços:

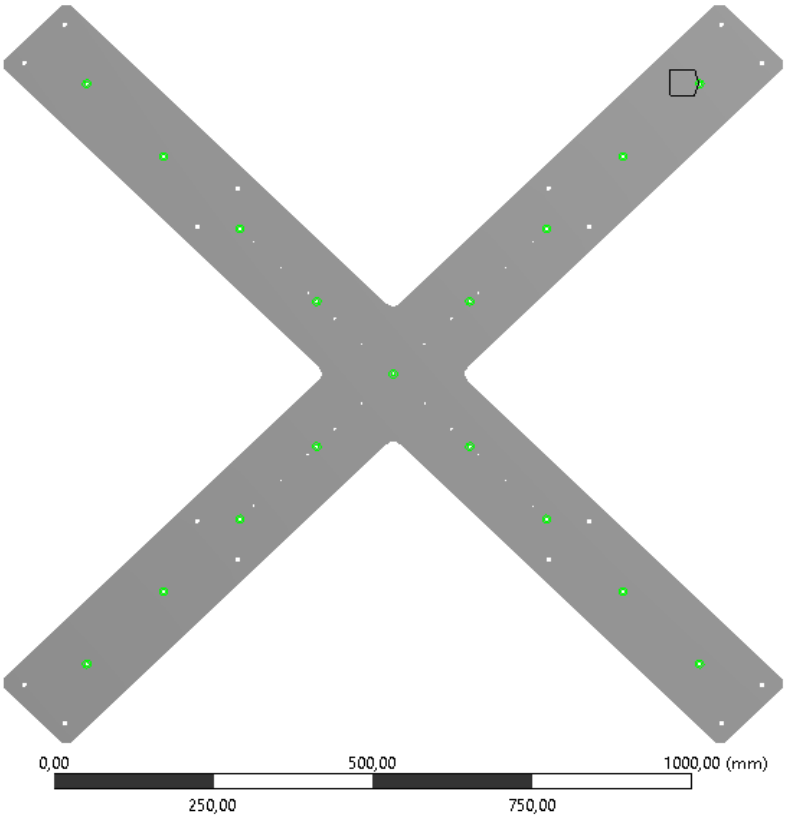
- <u>Deformação da estrutura com base no momento criado pelo atuador:</u> Avaliando a Figura 40, é possível observar que o centro do atuador está ligeiramente acima da chapa, mais especificamente 59,9mm, que quando multiplicado pela força máxima de 7,8 kN do atuador resulta em um momento de 467,2 kN.mm.

Figura 40 - Vista Lateral do Atuador

Fonte: Autores

Com isso, foi inserido no *software* que a chapa em cruz está com suportes fixos nos pontos em verde (porcas T), conforme Figura 41.

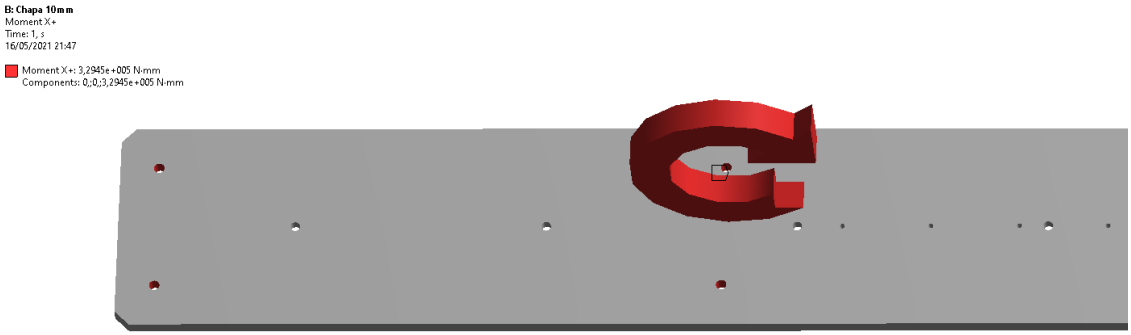
Figura 41 - Pontos de fixação da chapa em cruz



Fonte: Autores

Na sequência, foi selecionado os furos nos quais os parafusos do atuador estão posicionados e incluídos o momento citado acima, expresso na Figura 42.

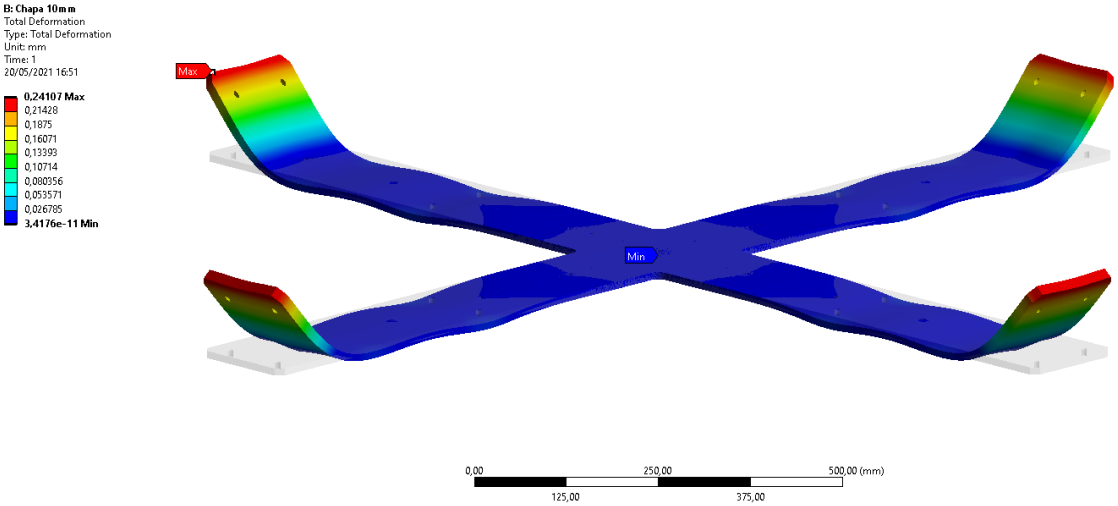
Figura 42 - Momento gerado pelo atuador



Fonte: Autores

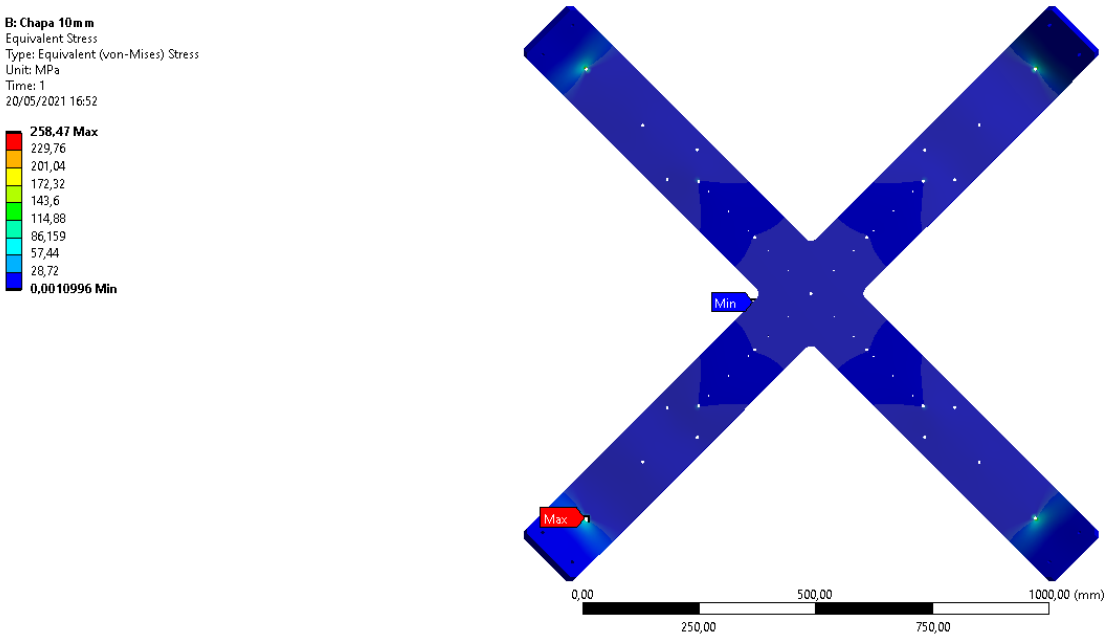
Com esses dados indicados, foram solicitados os resultados de tensão e deformação no *software*, obtendo os resultados expresso na Figura 43, Figura 44 e Figura 45. É importante ressaltar que a deformação é exagerada na visualização para que esta seja visível e que em cinza claro o corpo não deformado, para fins de comparação.

Figura 43 - Deformação causada pelos momentos



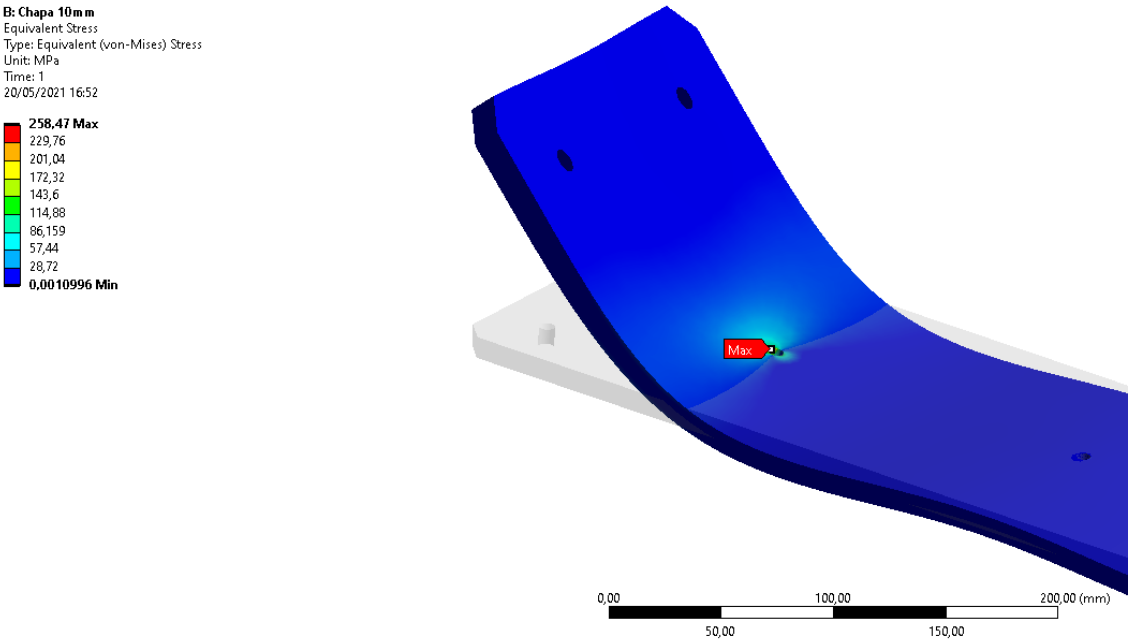
Fonte: Autores

Figura 44 - Tensões ao longo da peça



Fonte: Autores

Figura 45 - Área com maior tensão registrada



Fonte: Autores

Conforme mostrado, foram observadas deformações de 0,24 mm e tensões de 258,5 MPa, sendo a primeira pequena quando comparada ao tamanho da estrutura e a segunda dentro do limite elástico do material, o que pode ser considerada que esta atende às expectativas do grupo

e do projeto. Como a informação de deslocamento da figura mostrada é total, foram extraídos os resultados para cada eixo e disponibilizamos na Tabela 3.

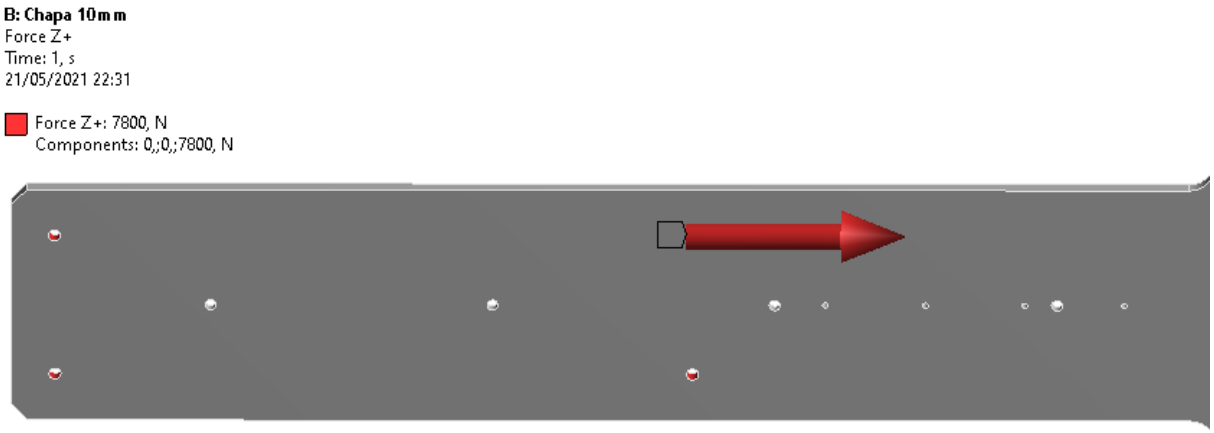
Tabela 3 - Deformações por eixo (Gerado pelo momento)

	Máxima [mm]	Mínima [mm]
Eixo X	0,01269	-0,01269
Eixo Y	0,24074	-0,02003
Eixo Z	0,01268	-0,01269

Fonte: Autores

- <u>Deformação da estrutura com base na força gerada pelo atuador:</u> Outra verificação que o grupo decidiu fazer foi considerar a força agindo diretamente no eixo, nas áreas as quais os parafusos dos atuadores foram fixados, para verificar qual seria este deslocamento. Para isso, foi utilizado um suporte fixo no centro da estrutura, simulando um escorregamento total em todas as porcas T, e inserimos a força de 7,8 kN atuando igualmente na área de fixação dos atuadores, conforme Figura 46.

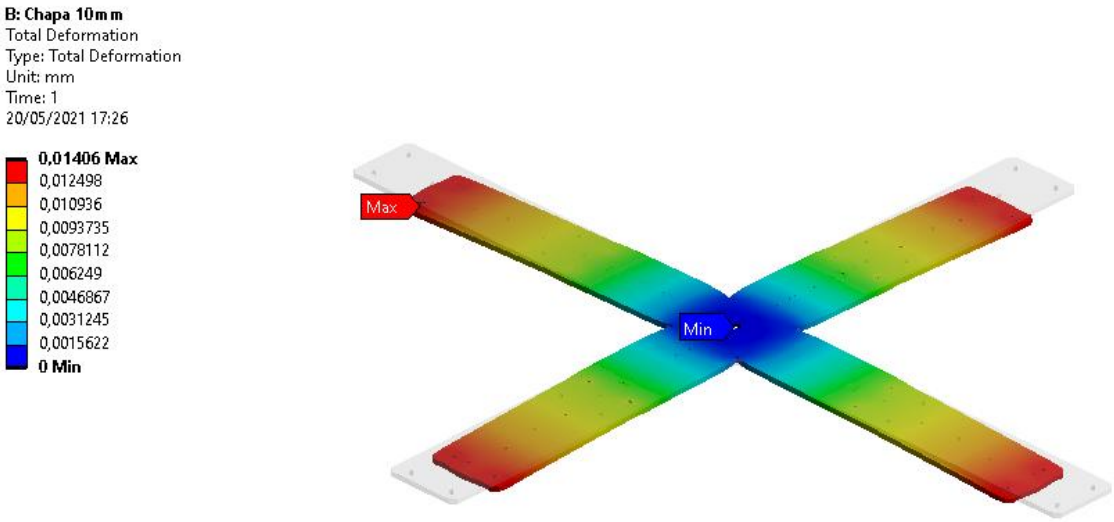
Figura 46 - Força na chapa



Fonte: Autores

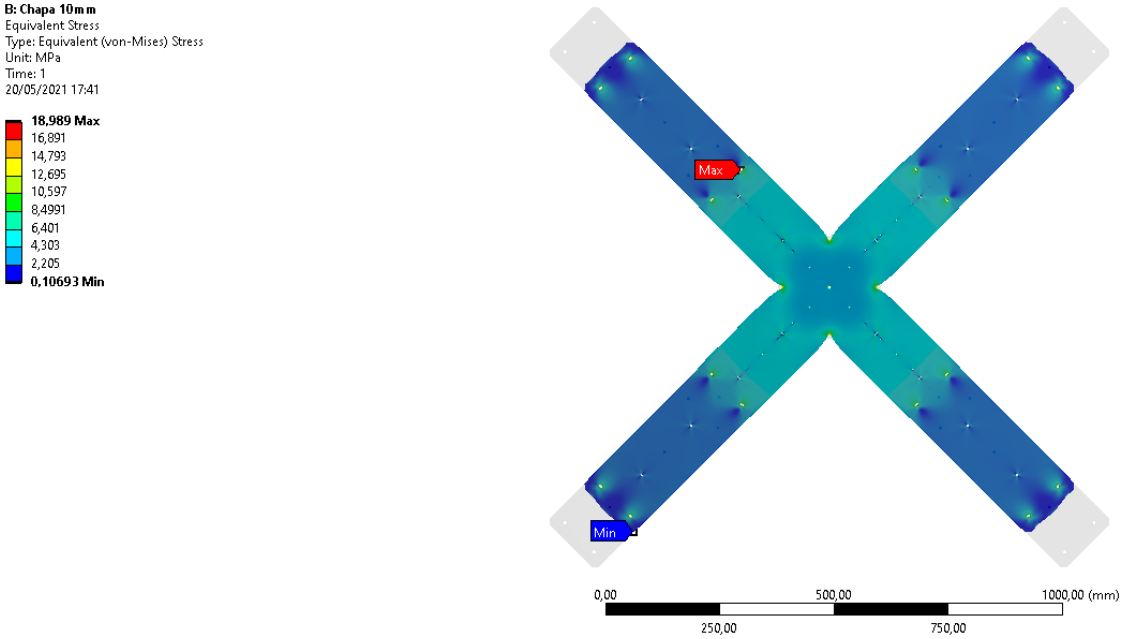
Vale notar que embora apareça apenas uma seta representando a força, ela está distribuída por todos os furos, como visto na região em vermelho na figura acima. Removendo apenas o momento e fazendo a substituição pelas forças, foram obtidos os resultados da Figura 47, Figura 48 e Figura 49.

Figura 47 - Deformação causada pelas forças



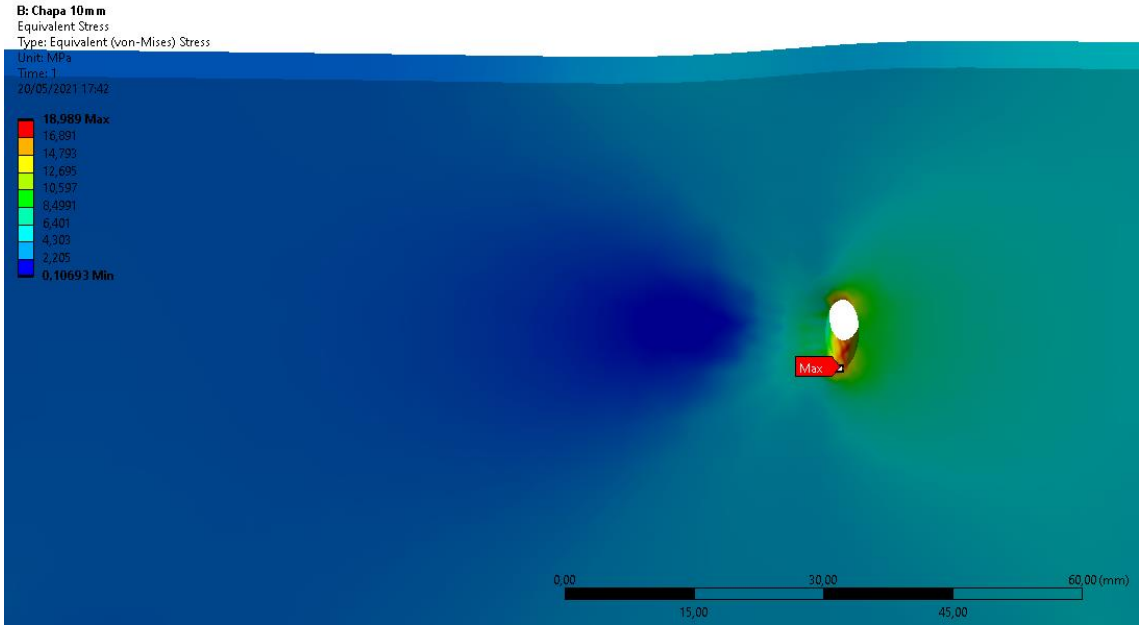
Fonte: Autores

Figura 48 - Tensões ao longo da peça



Fonte: Autores

Figura 49 - Área com maior tensão registrada



Fonte: Autores

Nessas condições, o resultado também foi bem satisfatório, a placa foi comprimida em apenas 0,02 mm em cada eixo e as tensões não passaram do limite elástico, sendo a máxima de 19,0 MPa nos locais onde o atuador é fixado. Novamente, é apresentada na Tabela 4 as deformações para cada eixo.

Tabela 4 - Deformações por eixo (Gerado pela força)

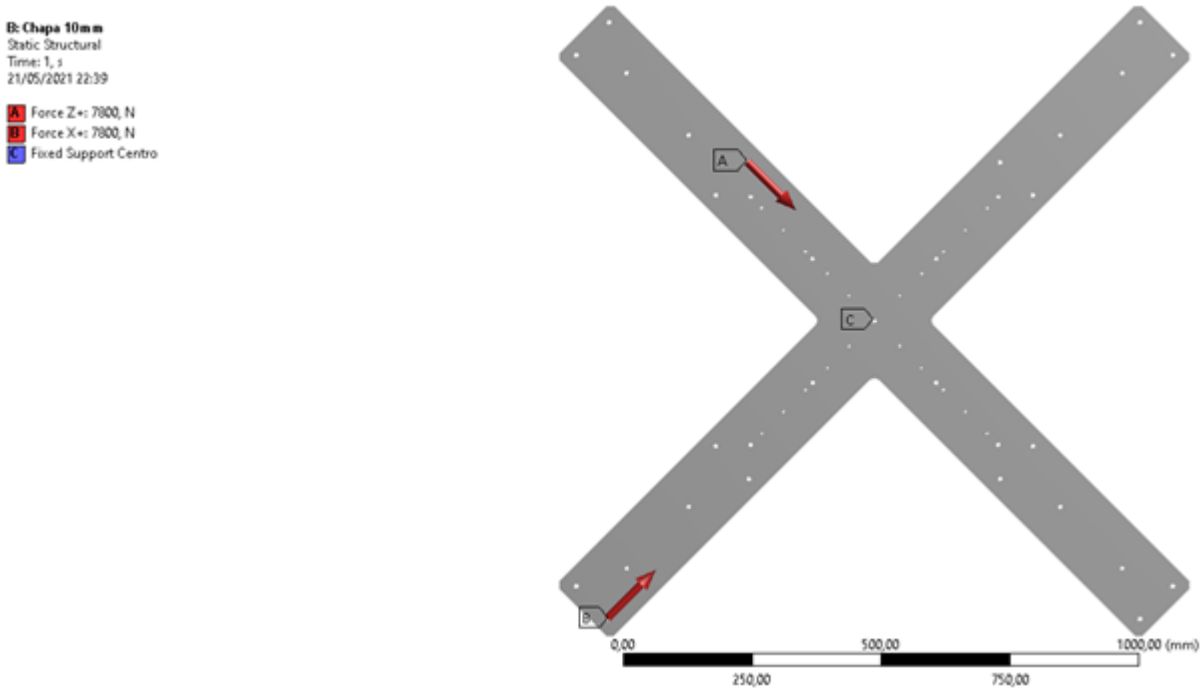
	Máxima [mm]	Mínima [mm]
Eixo X	0,01392	-0,01392
Eixo Y	0,00032	-0,00219
Eixo Z	0,01392	-0,01392

Fonte: Autores

Vale lembrar que inicialmente o projeto contava com uma chapa de 15mm, mas nessa condição a peça foi ensaiada e apresentou uma variação de deformação menor ainda, o que permitiu que fosse diminuída essa espessura, obtendo uma redução de 40% no peso desta peça.

Ainda nesta mesma etapa, foi simulado um caso no qual apenas um atuador por eixo estaria ligado, que seria o caso mais crítico e que pudesse ser observada a maior deformação no equipamento, conforme Figura 50.

Figura 50 - Modelamento com apenas 1 força por eixo



Fonte: Autores

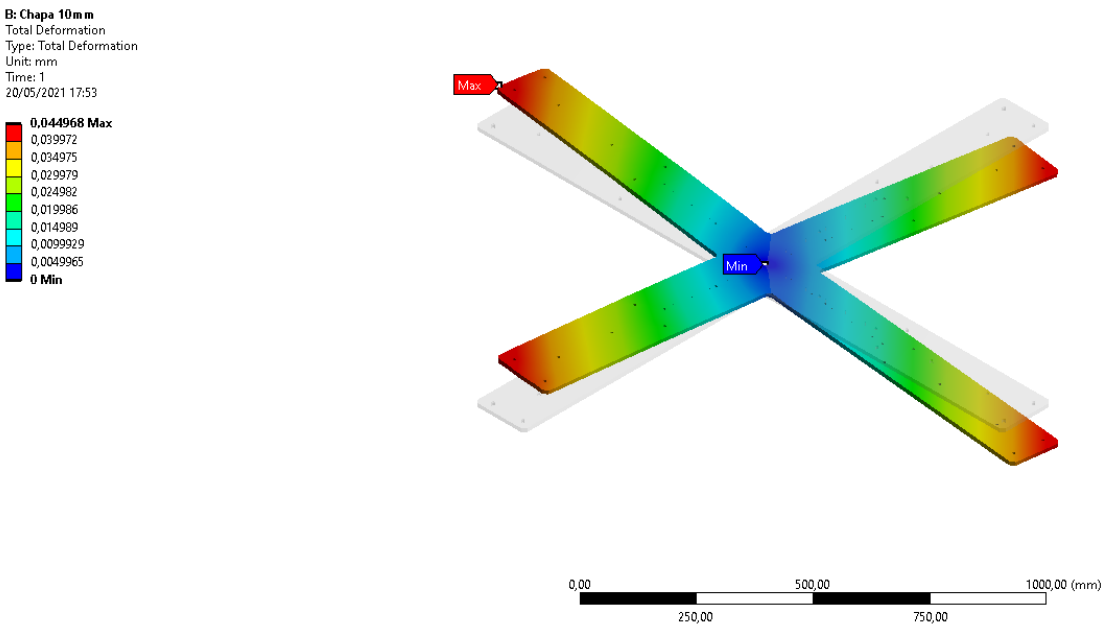
Neste caso, a deformação total máxima não passou de 0,03mm, como pode ser visto na Figura 51, e obteve deformações por eixo vide Tabela 5.

Tabela 5 - Deformações por eixo (Gerado pela força)

	Máxima [mm]	Mínima [mm]
Eixo X	0,01707	0,00000
Eixo Y	0,01707	-0,04340
Eixo Z	0,00000	-0,01709

Fonte: Autores

Figura 51 - Deformação causada pelas forças

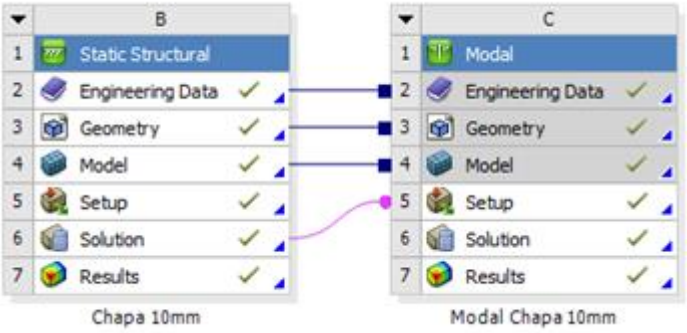


Fonte: Autores

4.2.2 ANÁLISE MODAL DA CHAPA EM CRUZ

Outra avaliação importante que deve ser feita na estrutura é a análise modal, para que seja possível obter as frequências naturais de vibração do equipamento. Embora a análise modal da estrutura de perfis seja a mais adequada para verificar o fenômeno de ressonância, pois contará com a estrutura completa, o grupo decidiu também por fazer para a chapa. Para isso, foram importadas todas as configurações da simulação estática estrutural e apenas adicionada à análise modal, seguindo o padrão do software que mostrará 6 modos de frequência, de acordo com a Figura 52.

Figura 52 - Compartilhamento de dados entre as análises



Fonte: Autores

Após execução da análise modal, os seguintes modos de frequência expressos na Figura 53 foram observados.

Figura 53 - Modos de frequência observados

Fonte: Autores

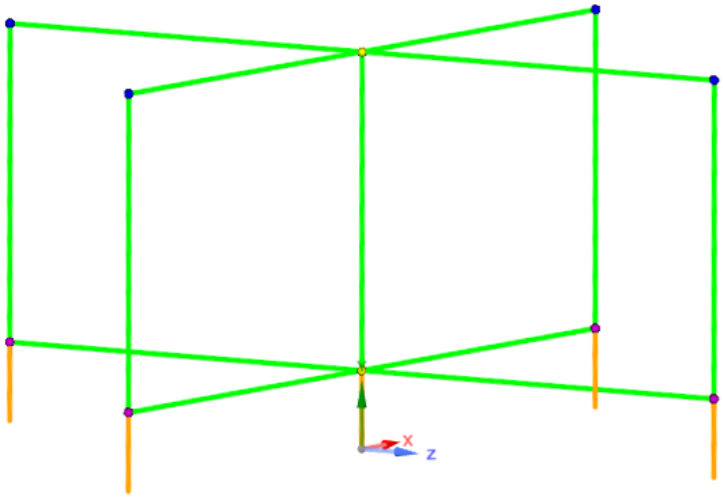
É possível concluir que os resultados foram positivos, uma vez que em nenhum dos modos foram encontradas frequências próximas de 60 Hz, o que poderia ocasionar um problema de ressonância, visto que esta é a frequência de operação dos atuadores.

4.3 ANÁLISE DA ESTRUTURA DE PERFIS METÁLICOS

Seguindo o fluxo de transmissão de forças no equipamento, avaliaremos a estrutura de perfis de alumínio. Conforme informado anteriormente, a ideia era seguir com a simulação da estrutura utilizado os perfis 3D, entretanto, devida a complexidade dos perfis, não foi possível. Outra maneira que representa bem o caso real é a utilização de elementos 1D.

Neste caso, foram levantadas as dimensões do equipamento e criadas linhas que representam cada perfil, conforme Figura 54.

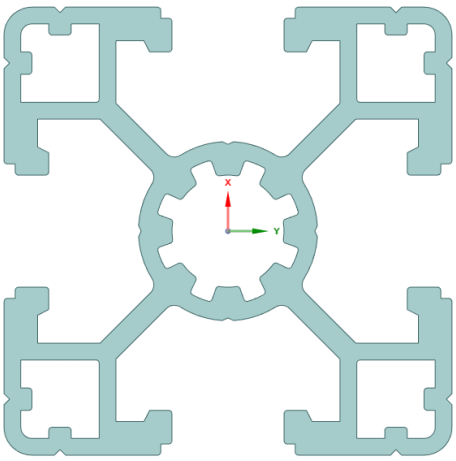
Figura 54 - Estrutura representada em elementos 1D



Fonte: Autores

Nessas linhas, o software permite inserir a geometria da área transversal do perfil desejado, o que fornece a informação de área, centro de gravidade, momento de inércia entre outras informações necessárias para realizar a simulação. Para esta simulação, foi importado o desenho 2D da área transversal do perfil, como podemos ver na Figura 55, e carregado no software.

Figura 55 - Área transversal do perfil escolhido



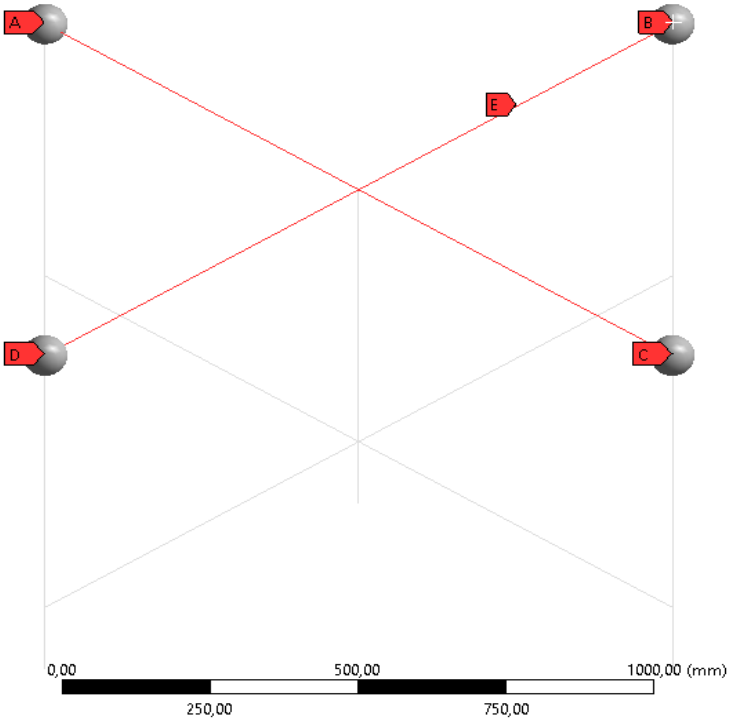
Fonte: Autores

4.3.1 ANÁLISE ESTÁTICA ESTRUTURAL DE PERFIS DE ALUMÍNIO

Com o desenho carregado, foi adicionado em cada vértice da parte superior da estrutura um ponto de massa de 11,88 Kg, que representa o peso do atuador, e uma massa distribuída por

toda a superfície da estrutura no valor de 33,68 Kg, representando o peso da chapa. Esses dados ficam visíveis no *software* conforme expressos na Figura 56.

Figura 56 - Representação das massas indicadas

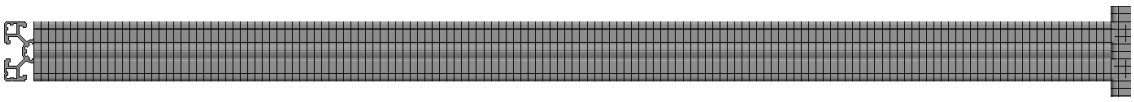


Fonte: Autores

É importante ressaltar que pela opção de trabalhar com elemento 1D, não é possível posicionar as massas em nenhum outro ponto que não sejam vértices, ou seja, a posição não é exatamente onde os atuadores estão localizados. De qualquer forma, a posição escolhida é mais crítica que a real, então caso esteja dentro dos limites na simulação, o caso real não teria problemas também.

Por tratar-se de um elemento 1D, a malha é mais simples e a única definição feita pelo grupo foi que esta tenha no máximo elementos de 5mm, pode-se ver o resultado na Figura 57.

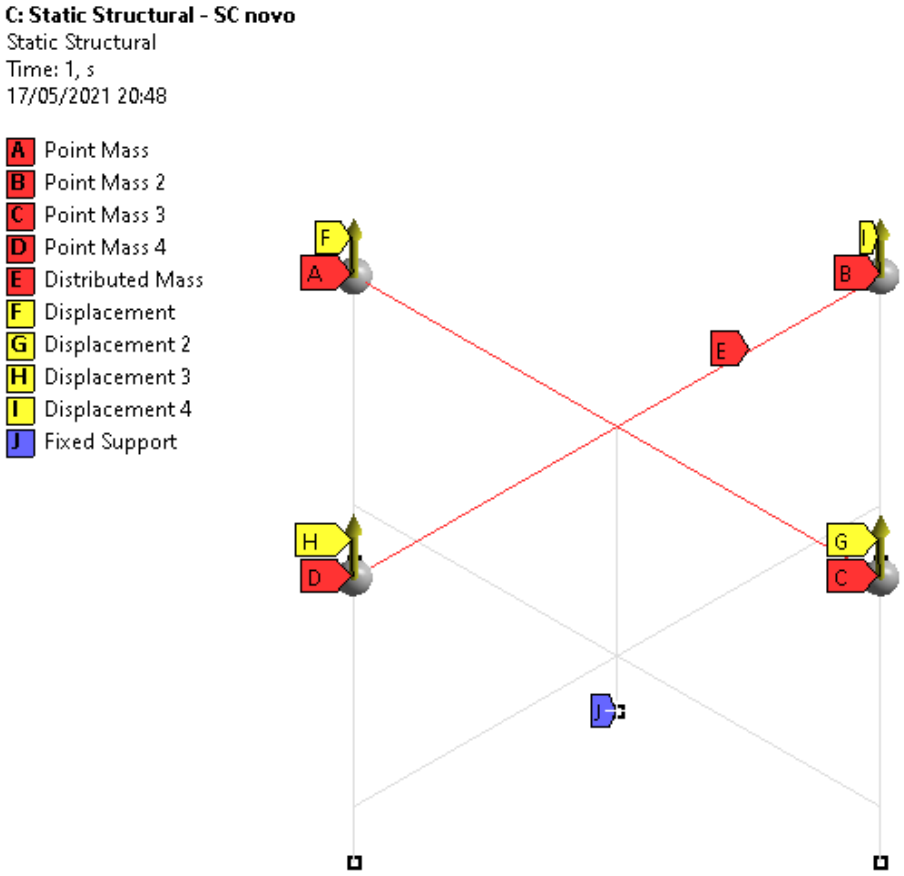
Figura 57 - Malha final na estrutura



Fonte: Autores

Com a malha definida, foi utilizado o *Fixed Support* em cada um dos 5 pés e com base no deslocamento máximo encontrado na simulação da chapa, definidos os deslocamentos aplicados através do *Displacement* em cada vértice. Isso porque entendendo que a chapa em cruz é o elemento que recebe diretamente os esforços e transmite estes deslocamentos para a estrutura de perfis através das porcas T, ela por si só deformaria proporcionalmente a chapa. Com esses dados inseridos, o modelamento ficou representado conforme Figura 58.

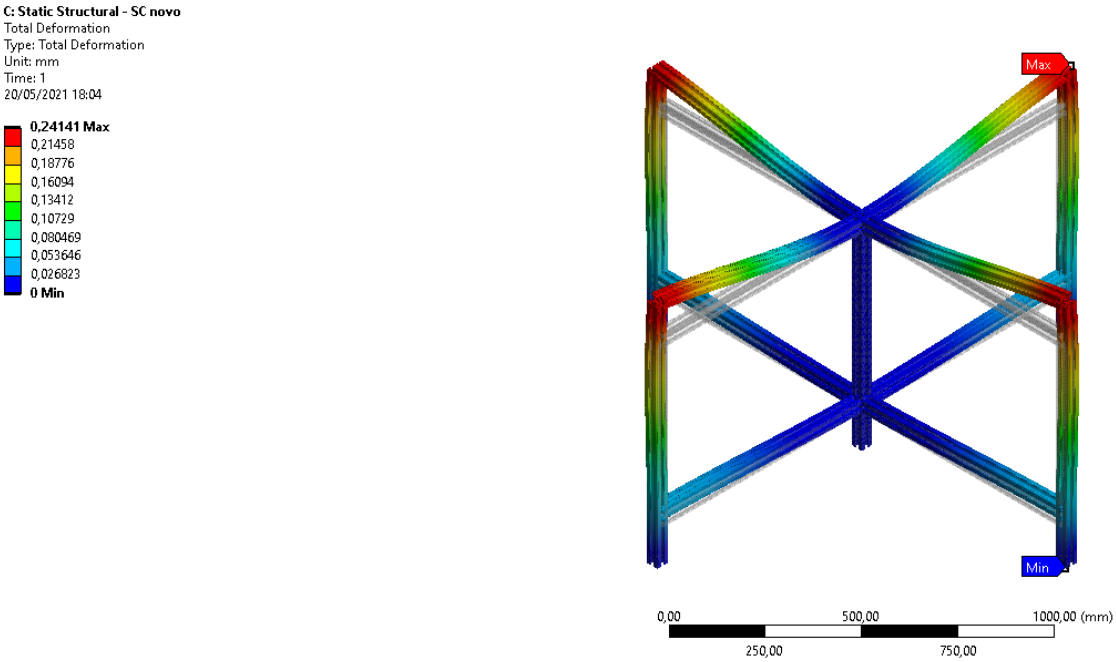
Figura 58 - Estrutura com todos os elementos representados



Fonte: Autores

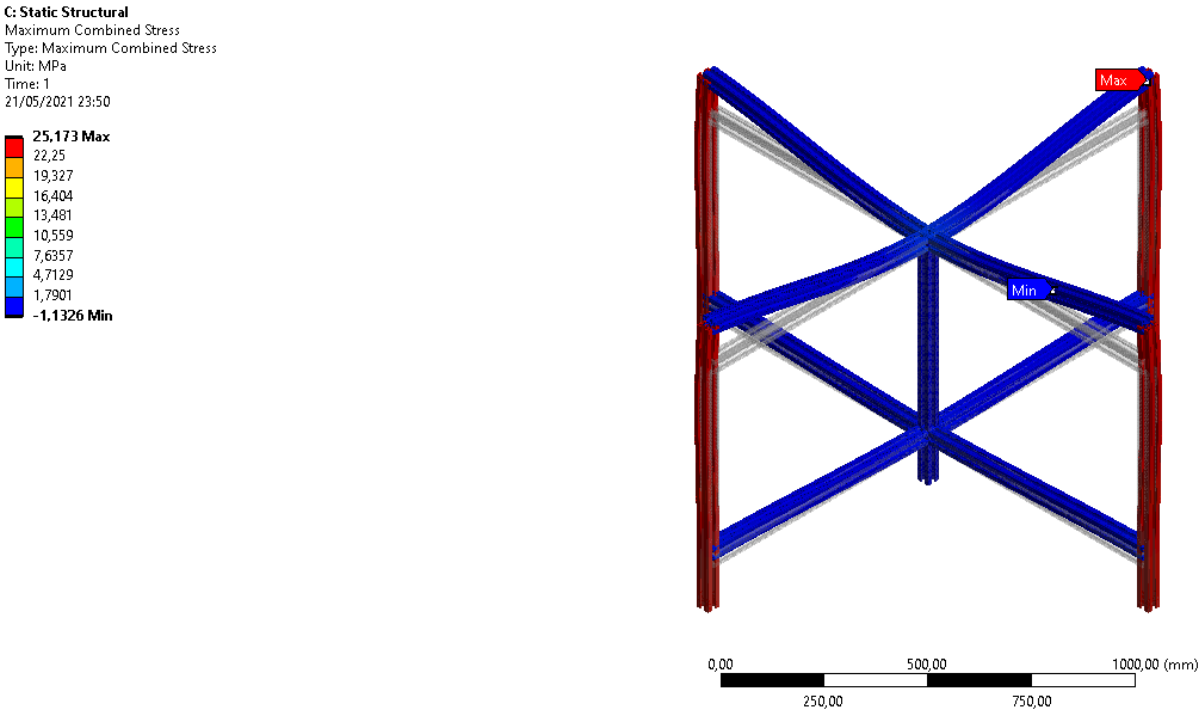
Para este caso, foi solicitado como resposta a deformação total da estrutura, que pelos dados inseridos deve ser bem próxima a deformação da chapa, e as tensões máximas combinadas através da ferramenta *Beam Tool*, utilizada em casos de elementos 1D. Obtendo assim os resultados expressos na Figura 59 e Figura 60.

Figura 59 - Deformação causada pelos deslocamentos



Fonte: Autores

Figura 60 - Tensões causadas pelos deslocamentos



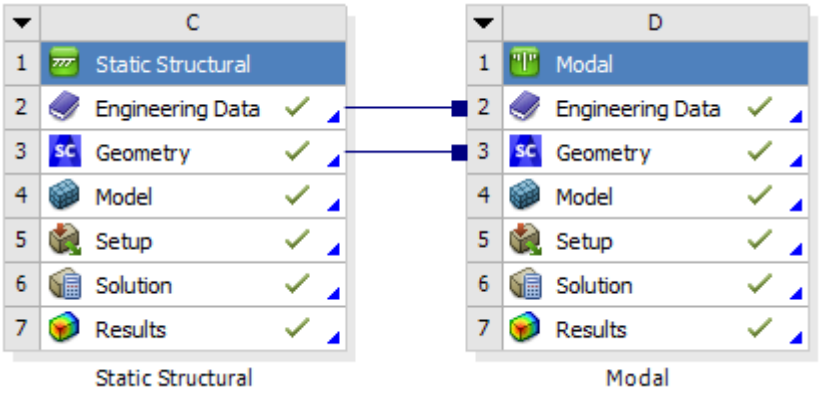
Fonte: Autores

Com estes resultados, foi confirmado que os deslocamentos foram inseridos corretamente e que a tensão máxima de 25,2 MPa está dentro do regime elástico do alumínio utilizado nos perfis.

4.3.2 ANÁLISE MODAL DA ESTRUTURA DE PERFIS DE ALUMÍNIO

Para a análise modal, foram carregadas as mesmas informações da análise estrutural e executada a simulação, vide Figura 61.

Figura 61 - Compartilhamento de dados entre análises



Fonte: Autores

Vale lembrar que para esta análise, também foram limitados os modos de frequência mostrados em 6, resultado expresso na Figura 62.

Figura 62 - Modos de frequência observados

Fonte: Autores

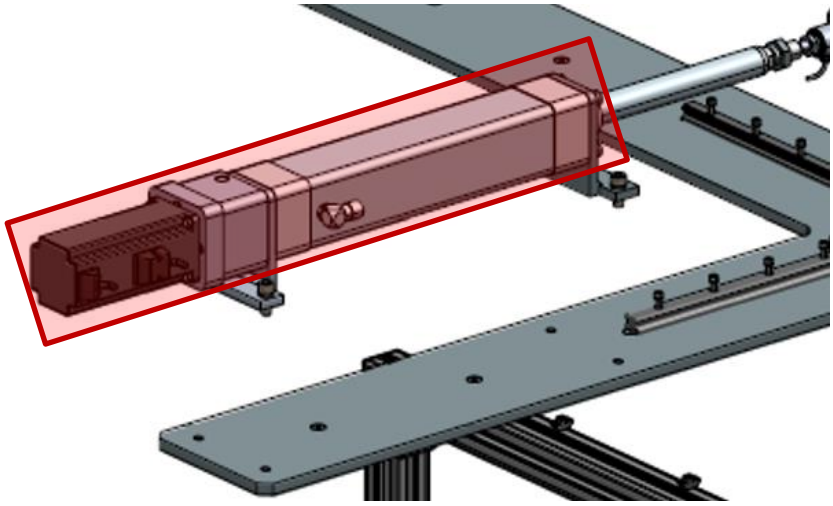
Nesta análise, também foi possível concluir que não ocorrerão problemas. Como neste caso as frequências também foram baixas e não estão próximas de 60 Hz, não haverá nenhum problema relacionado a ressonância.

4.4 ANÁLISE DA FIXAÇÃO DOS ATUADORES

Com a análise da estrutura completa concluída, o grupo optou por verificar também os esforços nos parafusos. Apesar do elemento de fixação dos atuadores ser definido pelo próprio fabricante e, portanto, já ter sido verificado que este atende as solicitações, o grupo optou por mensurá-las.

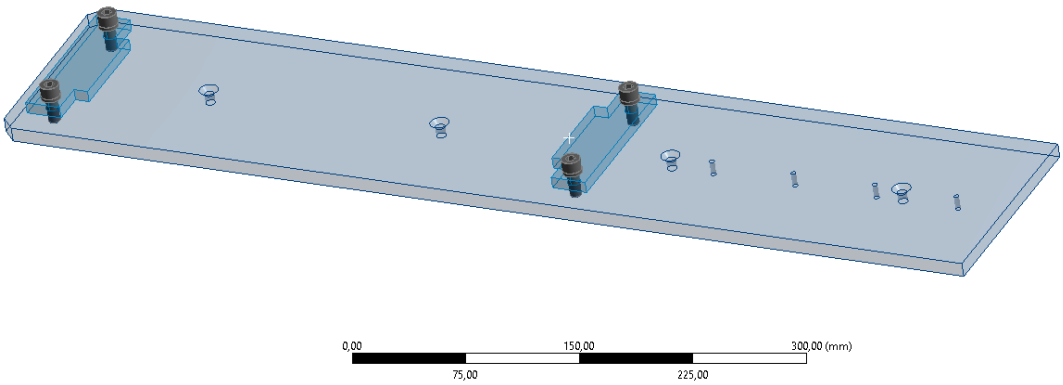
Para esta simulação, foram removidos todos os elementos que eram desnecessários para a mesma afim de evitar gerar elementos desnecessários e perder tempo de simulação com partes que não impactariam o resultado. Portanto, foi retirado o atuador e deixado apenas uma parte do elemento de fixação, parafusos e a chapa na qual estão fixados, conforme Figura 63 e Figura 64.

Figura 63 - Volume do atuador removido



Fonte: Autores

Figura 64 - Resultado da simplificação

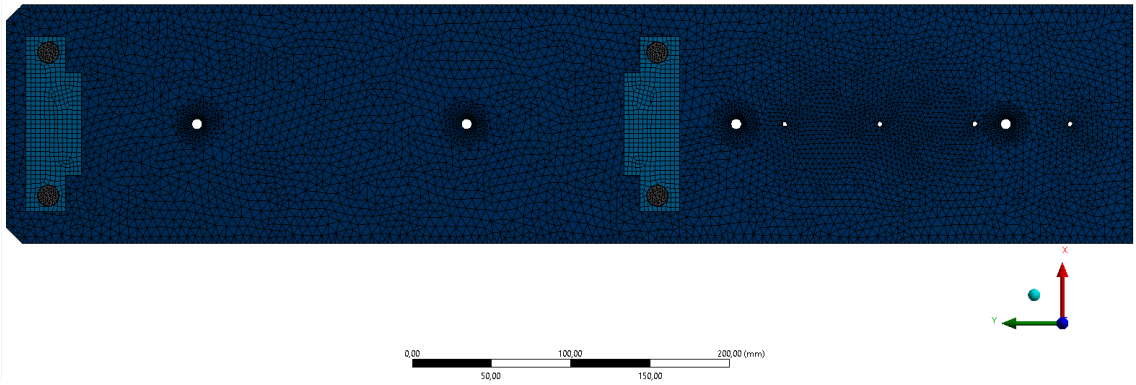


Fonte: Autores

Na definição do material, foi utilizado o aço SAE 1045 nas chapas, conforme definido anteriormente, e para os parafusos, o aço SAE 1050, pois é uma das opções possíveis para a produção de parafusos classe 8.8, usados no projeto.

Para a definição da malha, foi feita uma definição geral de elementos com no máximo 3mm, refino nas regiões de fixação dos atuadores e das porcas T e escolhido um valor menor ainda para os elementos dos parafusos, sendo o máximo de 2mm, podendo ser visto o resultado na Figura 65.

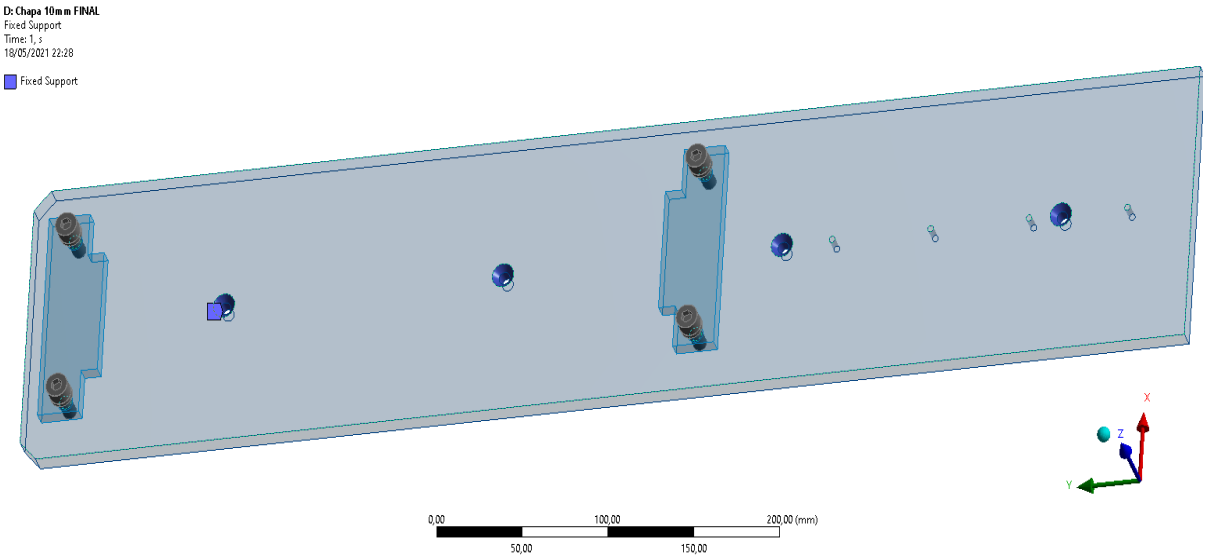
Figura 65 - Malha final



Fonte: Autores

Para fixação desta, foram colocados suportes fixos nas regiões das porcas T, conforme áreas em roxo expressa na Figura 66.

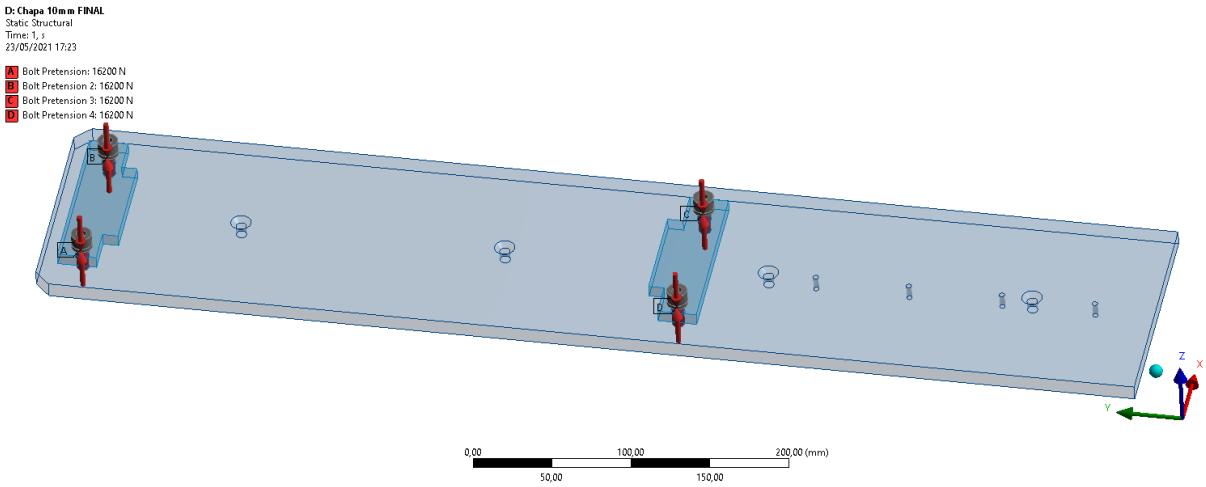
Figura 66 - Pontos de fixação



Fonte: Autores

Como esta etapa possui parafusos de fixação, foi utilizada também a ferramenta *Bolt Pretension*, que traz para a simulação a força de aperto nos parafusos, sendo esta definida como 16200 N, valor recomentado para parafusos M8 de classe 8.8, visto na Figura 67.

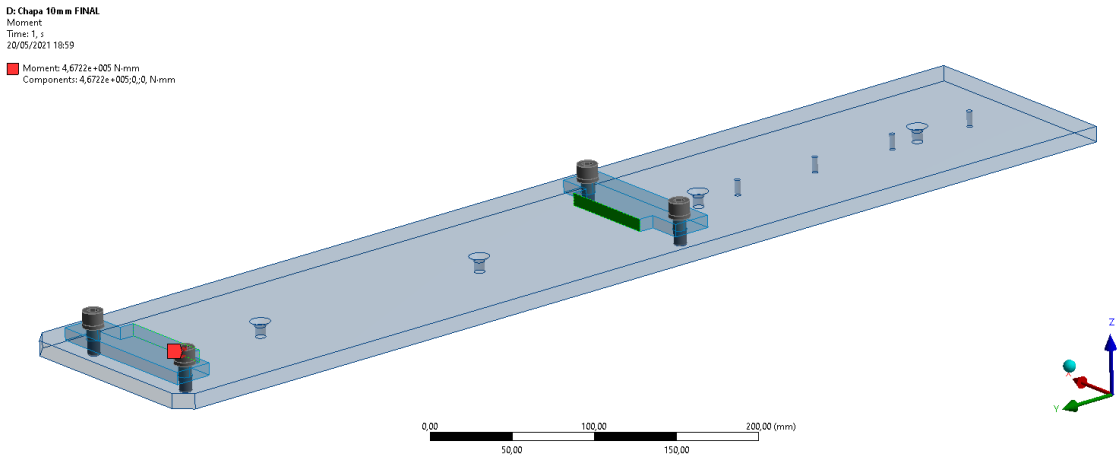
Figura 67 - Força de aperto nos parafusos



Fonte: Autores

Por fim, foi adicionado o mesmo valor de momento utilizado na simulação das chapas, 467,2 kN.mm, mas desta vez este foi aplicado nas áreas em verde, as quais seriam a continuação do elemento de fixação do atuador, podendo ser visto a seguir na Figura 68.

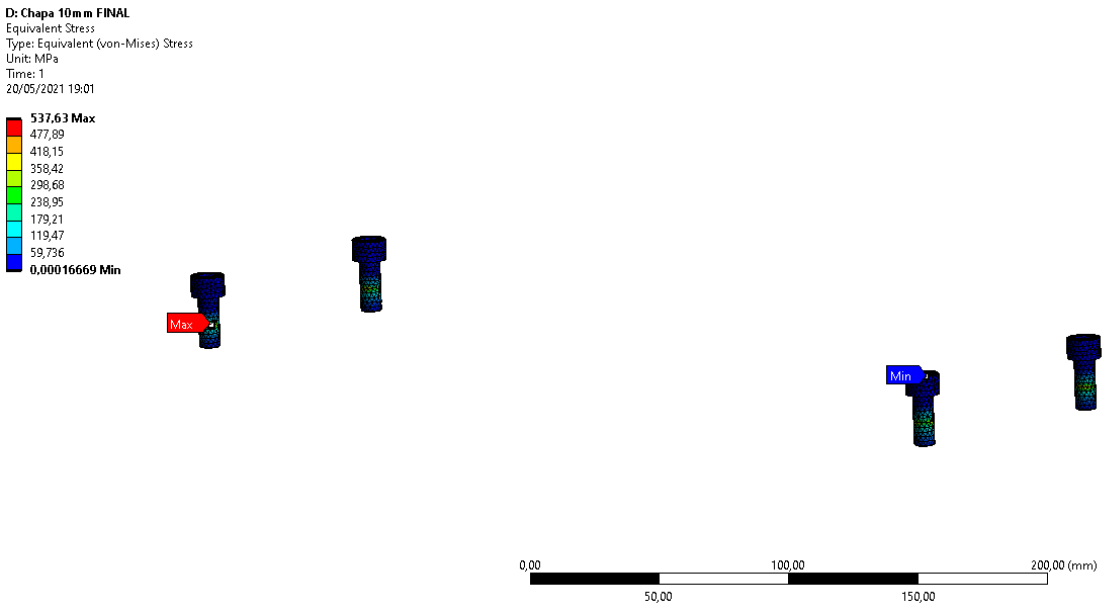
Figura 68 - Área de aplicação dos momentos



Fonte: Autores

Com isso, foram ocultados apenas da visualização todos os corpos com exceção dos parafusos e avaliadas as tensões, vide Figura 69.

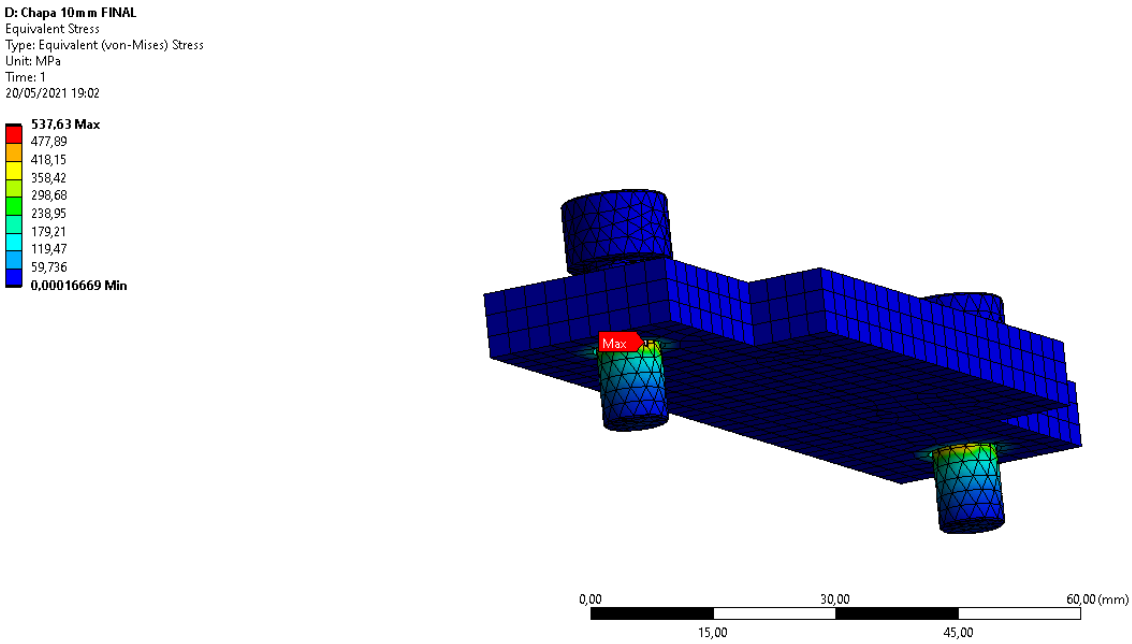
Figura 69 - Tensões obtidas nos parafusos



Fonte: Autores

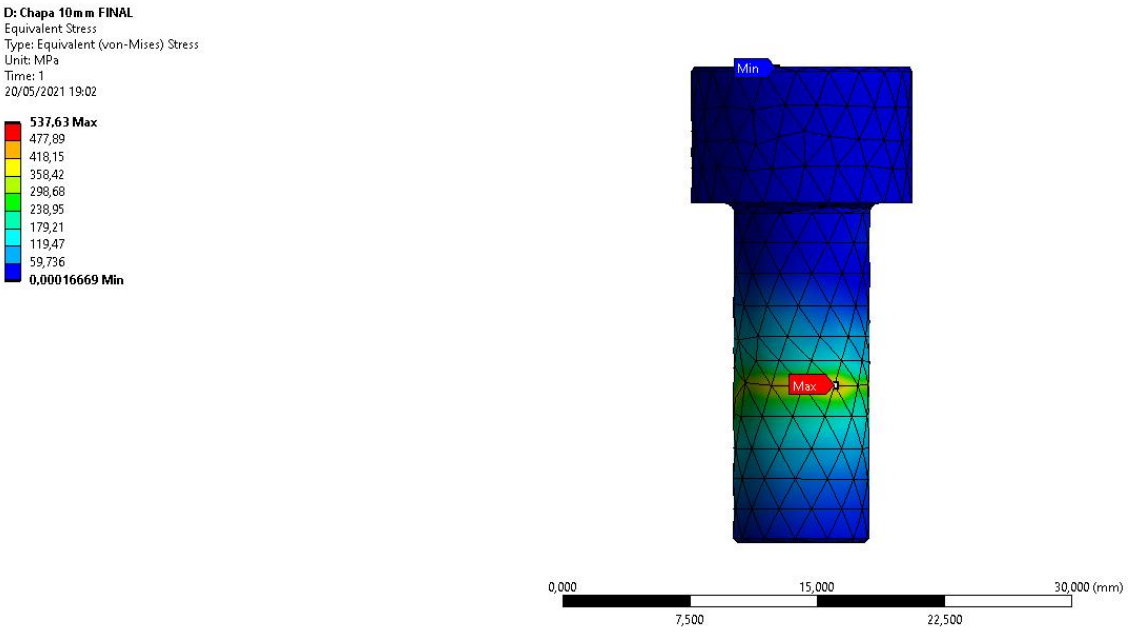
Conforme esperado, as máximas ocorreram na região de contato das chapas, resultando em um valor de 537,6 MPa, o que é aceitável, uma vez que os parafusos classe 8.8 tem limite de escoamento de 640 MPa, como pode-se ver na Figura 70 e Figura 71.

Figura 70 - Área de tensão máxima



Fonte: Autores

Figura 71 - Máxima tensão no parafuso



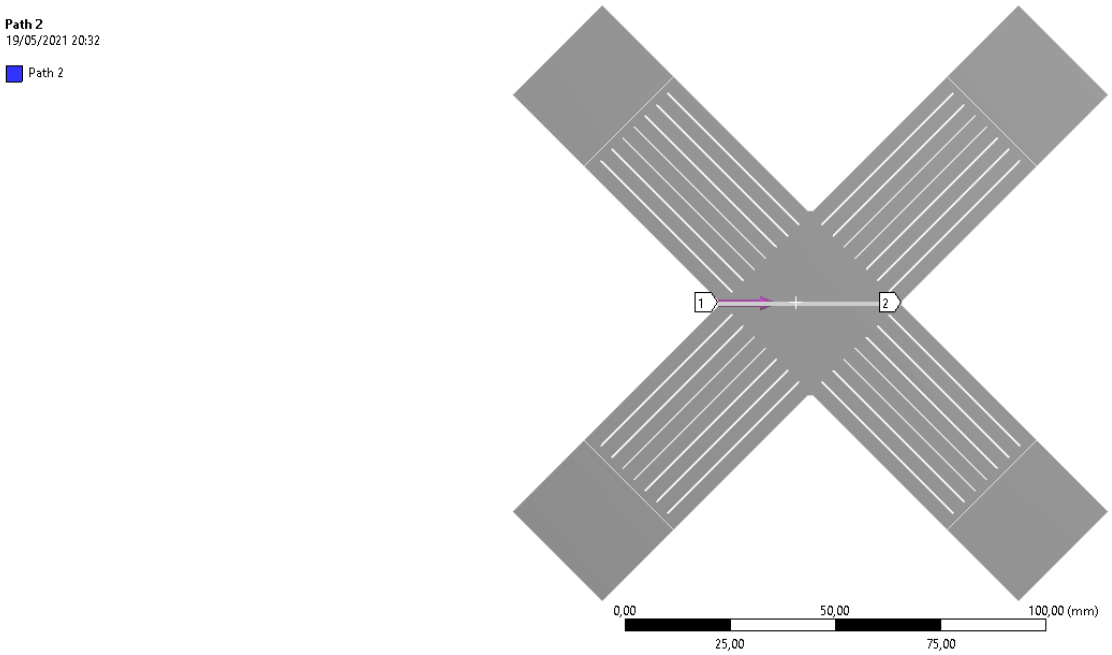
Fonte: Autores

4.5 ANÁLISE DO CORPO DE PROVAS

Outra verificação importante para o projeto é a análise do corpo de prova quando submetido ao ensaio biaxial na máquina. Esta verificação servirá para entender como o corpo de provas se porta durante o ensaio e o mais importante, verificar a escolha da capacidade dos atuadores. Este último ponto é importante pois inicialmente a força foi definida com base na área transversal do corpo de provas, como se o ensaio fosse realizado em apenas um eixo, o que não representa a realidade.

Para este caso, foi carregada a geometria apresentada previamente na definição do corpo de provas. Foi utilizado também o uso da ferramenta *Path*, que gera uma linha no objeto desejado com base nas coordenadas escolhidas. Neste caso, foi utilizado este *Path* para que fosse possível saber exatamente as tensões as quais o centro do corpo de provas está submetido, que é a região de interesse para o estudo, conforme Figura 72.

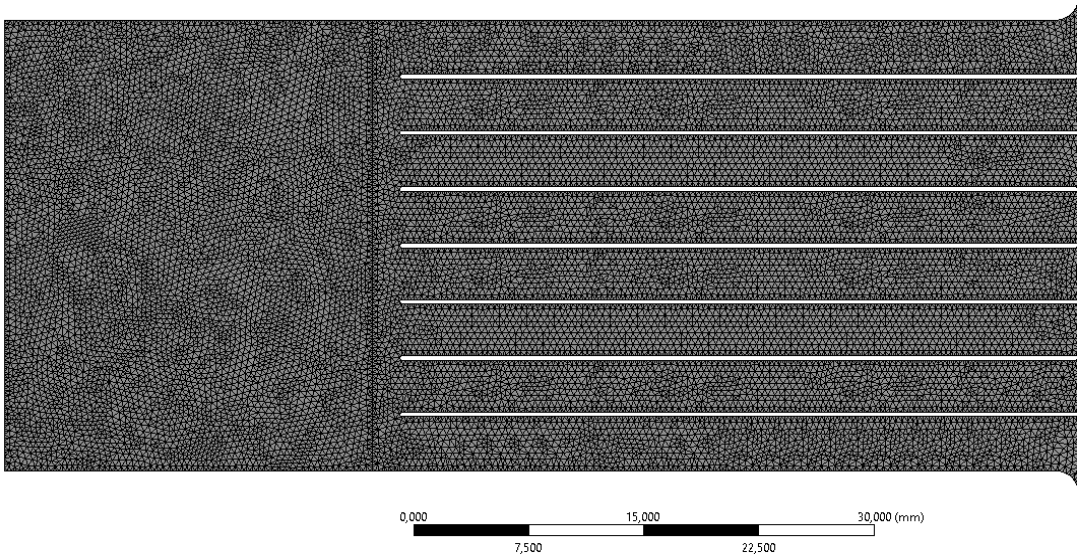
Figura 72 - Path no corpo de provas



Fonte: Autores

Visto que o corpo de provas possui raios bem pequenos, o grupo optou por usar elementos de no máximo 0,1mm, o que permite que fosse criada uma malha bem complexa nessas regiões, como pode ser visto na Figura 73.

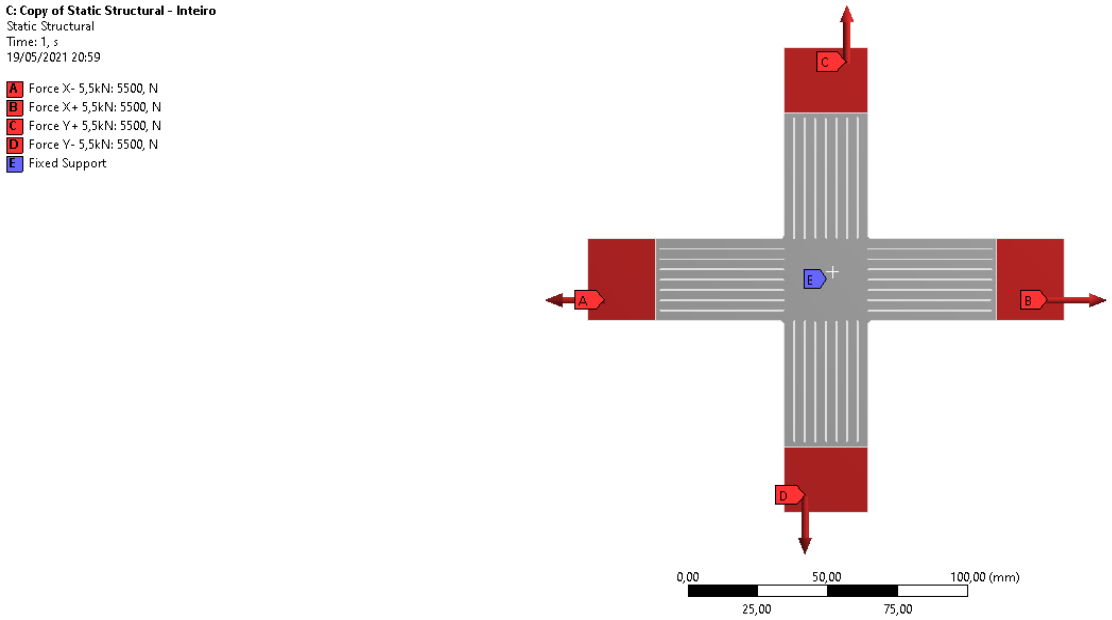
Figura 73 - Malha final



Fonte: Autores

Para os dados da simulação, foi definida uma força de 5,5 kN em cada braço aplicadas na área que representa a fixação das garras e um suporte fixo em um ponto no centro do corpo, conforme Figura 74. Este suporte fixo serve apenas para evitar que o corpo não fique solto no espaço, pois sem ele o software não permite iniciar a simulação.

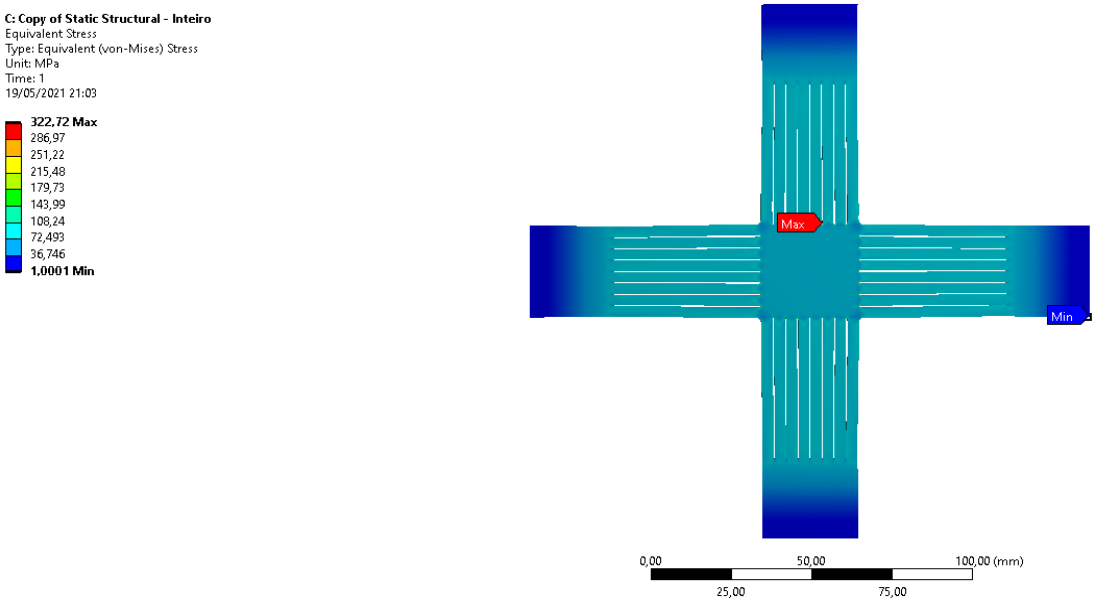
Figura 74 - Dados inseridos para simulação



Fonte: Autores

Com isso, observamos na Figura 75 as seguintes tensões no corpo:

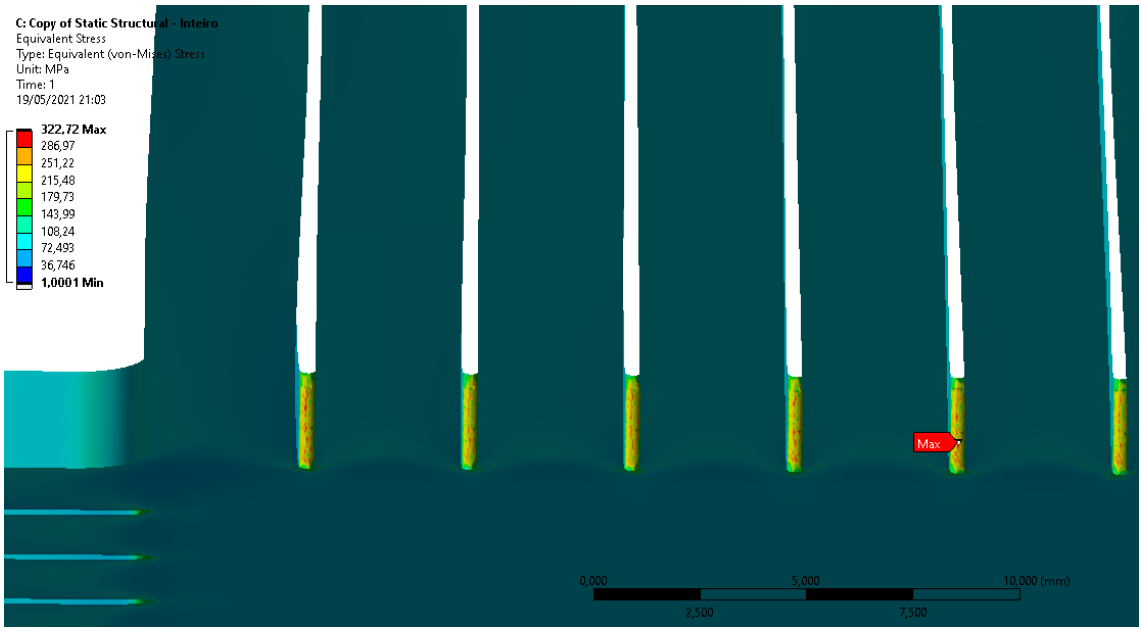
Figura 75 - Tensões no corpo de provas



Fonte: Autores

É possível notar na Figura 76 que as maiores tensões foram encontradas nos raios pequenos, o que já era esperado pois sua geometria favorece o acúmulo de tensões.

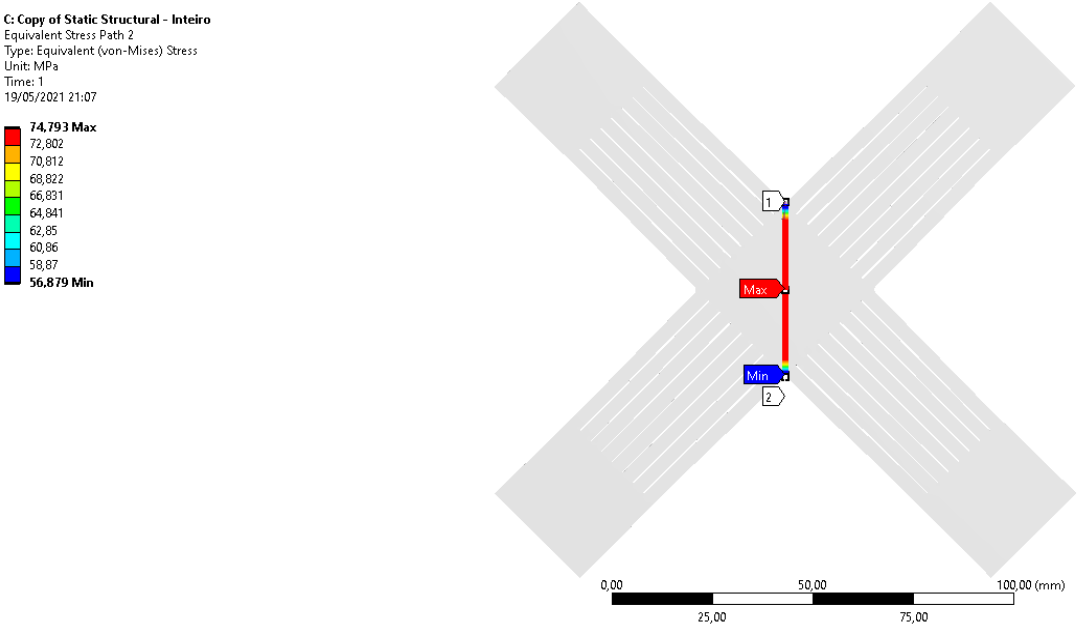
Figura 76 - Áreas de tensão máxima



Fonte: Autores

Já na área de interesse, foi observada uma tensão de máxima de 74,8 MPa, conforme Figura 77, o que indica que os atuadores previamente selecionados não seriam suficientes para gerar a tensão de 110 MPa planejada. Na verdade, é bem provável que a peça sofreria alguma fratura nas regiões de concentração de tensão e estas propagariam para o resto do corpo de provas. Mas entendendo que o *design* do corpo de provas é apenas sugerido e não o único possível ara ser utilizado na máquina, o grupo buscou atingir o valor de 110 MPa na área central.

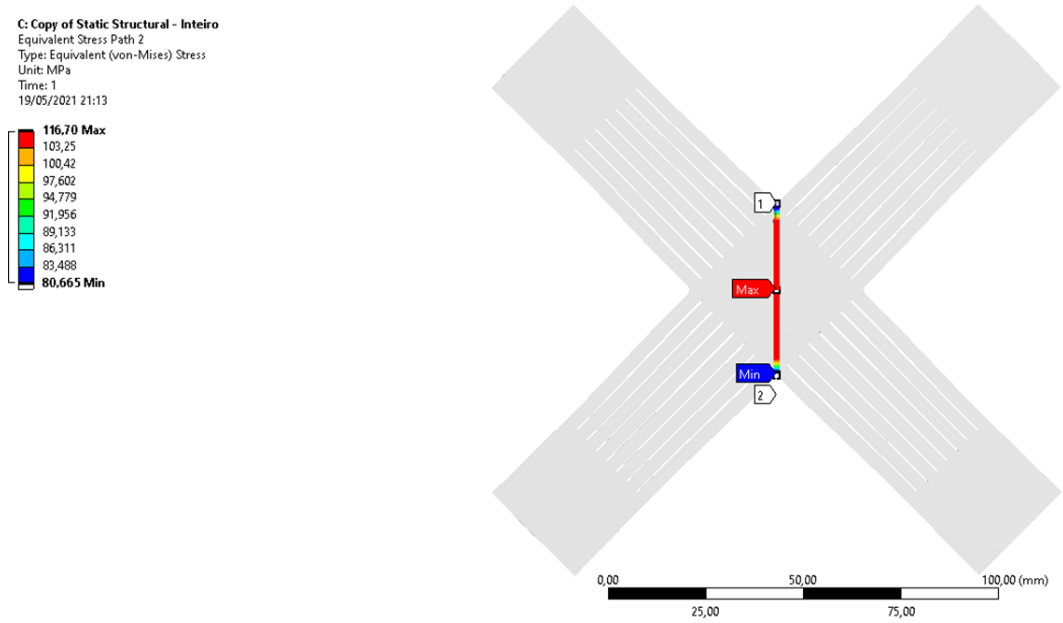
Figura 77 - Tensões observadas no Path



Fonte: Autores

Portanto, o grupo fez a troca por um atuador da mesma família do previamente informado. Este novo atuador é bem similar ao anterior, sendo a principal diferença o passo da rosca, que neste caso é de 5mm. Esta versão é capaz de exercer forças de até 7,8 kN, sendo este valor utilizado no mesmo setup mostrado anteriormente, o que gerou os resultados expressos na Figura 78.

Figura 78 - Novas tensões observadas no Path

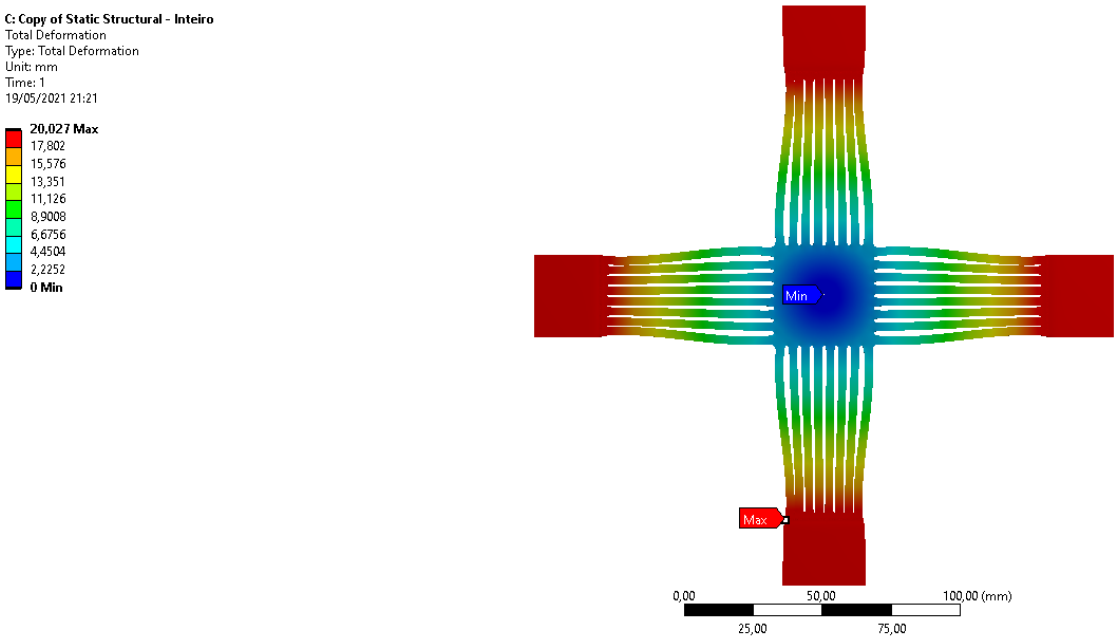


Fonte: Autores

Como é possível observar na imagem acima, o resultado com estes novos atuadores atende o planejado, portanto, serão os selecionados para o projeto.

Apenas como curiosidade, o grupo substituiu as forças por deslocamentos de 20mm para entender o comportamento do corpo de provas quando submetido ao ensaio e o resultado mostrado na Figura 79 seria a provável forma em escala para o caso do ABS.

Figura 79 - Deformações observadas



Fonte: Autores

5 ORÇAMENTO DO PROJETO

Para estimar o valor aproximando do projeto, foi cotada a lista de peças abaixo, resultando em um valor total de R$ 92.833,71.

Tabela 6 - Lista de Materiais

Item	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Arruela de Pressão DIN 127 M4	20	R$ 1,35	R$ 27,00
Arruela de Pressão DIN 127 M5	4	R$ 2,11	R$ 8,44
Arruela de Pressão DIN 127 M6	12	R$ 4,79	R$ 57,48
Arruela de Pressão DIN 127 M8	16	R$ 7,06	R$ 112,96
Atuador EMC 050 NN2 150 Mm**	4	R$ 18.090,00	R$ 72.360,00
Cable Duct (Passa-Cabo) - 1360 Mm	1	R$ 169,90	R$ 169,00
Cantoneira P/ Perfil De Alumínio 40 X 40	32	R$ 12,50	R$ 400,00
Capa P/ Perfil De Alumínio 40 X 40	4	R$ 1,50	R$ 6,00
Célula De Carga U9C**	4	R$ 1.000,00	R$ 4.000,00
Dobradiça P/ Perfil De Alumínio	2	R$ 16,80	R$ 33,60
Controladora HCS/CSB**	1	R$ 910,80	R$ 910,80
Guia Linear OBR-A-15E	4	R$ 142,70	R$ 157,50
Interface Célula De Carga MX440B**	1	R$ 5.649,00	R$ 5.649,00
Painel IHM PC VR3 15**	1	R$ 4.088,18	R$ 4.088,18
Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica Din 912 M4 X 16	16	R$ 20,83	R$ 333,28
Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica Din 912 M4 X 20	20	R$ 21,81	R$ 436,20
Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica Din 912 M5 X 16	4	R$ 24,85	R$ 99,40
Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica Din 912 M6 X 12	4	R$ 28,69	R$ 114,76
Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica Din 912 M6 X 16	6	R$ 29,58	R$ 177,48
Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica Din 912 M6 X 20	2	R$ 30,23	R$ 60,46
Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica Din 912 M8 X 20	16	R$ 62,04	R$ 992,64
Parafuso Allen Sem Cabeça DIN 913 M8 X 30	2	R$ 2,00	R$ 4,00
Parafuso Cabeça Escareada Din 7991 M6 X 20	17	R$ 1,18	R$ 20,06
Pé De Nivelamento P/ Perfil 40 X 40	5	R$ 31,50	R$ 157,50
Perfil De Alumínio 40 X 40 Slot 10 - 9300 Mm	15	R$ 52,00	R$ 780,00
Pino Guia DIN 7979 Ø6 X 30	2	R$ 4,57	R$ 9,14
Porca Parlock Din 985 M6	2	R$ 12,68	R$ 25,36
Porca T Slot 10 M6	17	R$ 25,00	R$ 425,00
Suporte P/ Chapa - 6600 Mm	1	R$ 24,90	R$ 24,90
Trava Porta P/ Perfil De Alumínio**	1	R$ 1.193,57	R$ 1.193,57
**Valores estimados			

Fonte: Autores

6 CONCLUSÕES

Após diversas pesquisas e estudos aprofundados na área da manufatura aditiva, ficou evidente a crescente demanda e importância deste método de fabricação, deixando claro que aqueles que possuírem conhecimento específico no segmento terão vantagens competitivas no mercado.

Quanto ao equipamento, foi possível desenvolver e aprimorar o projeto de uma máquina biaxial de tração, de fácil montagem e manutenção, capaz de realizar ensaios em grande parte dos materiais poliméricos utilizados na manufatura aditiva atualmente.

A utilização do CAD (*Computer Aided Design*) foi de grande auxílio para a criação do modelo 3D, permitindo a visualização do layout de forma mais clara. A simulação numérica realizada através do método de elementos finitos no software Ansys Workbench foi crucial para a validação estrutural do nosso projeto, permitindo diferentes testes e cenários, possibilitando otimizações nas geometrias e materiais empregados.

Entendeu-se que este é o início de um projeto e que existem melhorias a serem implementadas, como o desenvolvimento do sistema de controle e de aquisição de dados, portanto, ficando aberto para que qualquer outro grupo aprimore o equipamento e inicie o processo construtivo.

REFERÊNCIAS

***3-D printing takes shape,* 2019**. Disponivel em: < https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/3-d-printing-takes-shape>. Acesso em: 10 Junho 2021.

A Importância da Isotropia na Impressão 3D. Disponível em: <https://filament2print.com/pt/blog/91_isotropia-impressao-3d.html>. Acesso em: 18 Junho 2021.

A.V. SHUTOV, P.P. LAKTIONOV, Y.S. NEKRASOVA. ***Extending uniaxial material laws to multiaxial constitutive relations. European Journal of Mechanics / A Solids*.** Novosibirsk, Russia, 30 Dezembro 2019. 9.

AMARO, M. **Você S/A. Site da Abril**, 2019. Disponivel em: <https://vocesa.abril.com.br/mercado-vagas/as-impressoras-3d-vao-mudar-o-mundo-e-esses-setores-ja-estao-se-adaptando/>. Acesso em: 3 Dezembro 2020.

GARDAN, J. MAKKE, A. RECHO, N. (2018) ***Improving the fracture toughness of 3D printed thermoplastic polymers by fused deposition modeling.*** Disponivel em: < https://link.springer.com/article/10.1007/s10704-017-0257-4>. Acesso em: 23 Junho 2020.

AZEVEDO, W. **Precisão Engenharia**, 2020. Disponivel em: <https://precisaoeng.com/ensaio-tracao/#:~:text=O%20Ensino%20de%20Tra%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A9,at%C3%A9%20a%20fratura%20(rompimento).&text=Essas%20caracter%C3%ADsticas%20s%C3%A3o%20obtidas%20por,como%20o%20ensaio%20de%20tra%C3%A7%C3%A3o.>. Acesso em: 3 Dezembro 2020.

CATÁLOGO BOSCH REXROTH AG - CILINDRO ELETROMECÂNICO EMC. **BOSCH REXROTH.** Disponível em: <https://www.boschrexroth.com/documents/12605/31489817/R999000493_2018_11_EN_EMC_G2_Media.pdf/86196aff-0fc1-bf70-d3dd-c238164cc5a6>. Acesso em 19/06/2021.

CATÁLOGO HBM PARA A CÉLULA DE CARGA U9C. **HDM 2021**. Disponível em: < https://www.hbm.com/pt/3926/celula-de-carga-u9c-para-forcas-de-tracao-e-compressao/>. Acesso em 17/06/2021.

CCDM. **Site da UFSCAR**. Disponivel em: <http://www.ccdm.ufscar.br/polimeros-ensaios-tecnologicos/ensaios-mecanico/ensaio-de-compressao/>. Acesso em: 3 Dezembro 2020.

CCDM. **Site da UFSCAR**. Disponivel em: <http://www.ccdm.ufscar.br/materiais-metalicos-ensaios-tecnologicos/ensaios-mecanicos/ensaio-de-compressao/>. Acesso em: 3 Dezembro 2020.

Célula de Carga U9C; **HBM**. Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/3926/celula-de-carga-u9c-para-forcas-de-tracao-e-compressao/>. Acesso em: 19 Junho 2021.

CLASSE DE RESISTÊNCIA DE PARAFUSOS; **INDUFIX**. Disponivel em: < https://www.indufix.com.br/classe-de-resistencia-de-parafusos/>. Acesso em: 09 Maio 2021.

Como Funciona uma Impressora 3D; **Boa Impressão 3D**. Disponível em: <https://boaimpressao3d.com.br/aplicacoes/como-funciona-impressora-3d-fdm/>. Acesso em: 19 Junho 2021.

Como Trabalha uma Célula de Carga; **HBM**. Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/6768/como-uma-celula-de-carga-trabalha/>. Acesso em: 19 Junho 2021.

CURSOS Essel. **Essel**. Disponivel em: <https://essel.com.br/cursos/material/01/EnsaioMateriais/ensa06.pdf>. Acesso em: 3 Dezembro 2020.

Diagrama de Tensão Deformação; **O Pórtico.com**. Disponível em: <http://o-portico.blogspot.com/2015/10/diagrama-tensao-deformacao-ductilidade.html>. Acesso em: 19 Junho 2021.

ELECTROMECHANICAL CYLINDER; **BOSCH REXROTH**. Disponivel em: < https://www.boschrexroth.com/pt/br/produtos/grupos-de-produtos/tecnologia-de-acionamento-linear/linear-axes-and-electromechanical-cylinders/electromechanical-cylinder/emc/emc-050-nn-2>. Acesso em: 25 Maio 2021.

EM PARCERIA INÉDITA, SENAI CIMATEC INAUGURA NOVA ERA PARA INDÚSTRIAS BRASILEIRAS. **SENAI CIMATEC**, 2019. Disponivel em: < http://www.senaicimatec.com.br/noticias/em-parceria-inedita-senai-cimatec-inaugura-nova-era-para-industrias-brasileiras/>. Acesso em: 13 Junho 2021.

Ensaio de Compressão; **Researchgate**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-9-Ensaio-de-Compressao-a-forca-de-compressao-aplicada-ao-provete-b-setup_fig2_277330897>. Acesso em: 19 Junho 2021.

Ensaio de Tração; **Biopdi**. Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/>. Acesso em: 19 Junho 2021.

FAILURE PREDICTION OF HYBRID COMPOSITE USING ARCAN'S DEVICE AND. ***POLYMER TESTING***, Santo André, Brasil, 3 Janeiro 2017. 6.

GARTH M. PEARCE∗, C. T. Y. H. E. Q. N. T. C. *A modified Arcan test for mixed-mode loading of bolted joints in composite.* ***Composite Structures***, Australia, 22 Dazembro 2017. 9.

GRAND VIEW REASERCH. ***Grand View Reaserch***, 2020. Disponivel em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/global-plastics-market>. Acesso em: 3 Dezembro 2020.

H. WUA, W. P. F. S. K. H. K. N. Z. L. P. A. K. S. B. J. H. K. *Recent developments in polymers/polymer nanocomposites for.* ***Progress in Materials Science***, Austin, EUA, 27 Janeiro 2020. 47.

ISO 16842:2014 – *METALLIC MATERIAL – SHEET AND STRIP – BIAXIAL TENSILE TESTING METHOD USING A CRUCIFORM TEST PIECE*. Disponível em: < https://www.iso.org/standard/57812.html>. Acesso em: 18 Junho 2021.

J. NODER, C. B. *A comparative investigation into the influence of the constitutive model on the prediction of in-plane formability for Nakazima and Marciniak tests.* ***International Journal of Mechanical Sciences***, Waterloo, Canada, 7 Setembro 2019. 27.

J.M. GREER JR., S. E. G. D. M. J. H. S*ome comments on the Arcan mixed-mode (I/II) test specimen.* ***Engineering Fracture Mechanics***, USA, 31 Março 2011. 7.

J.M.P. MARTINS, A. A.-C. S. T. *Calibration of anisotropic plasticity models using a biaxial test and the virtual fields method.* ***International Journal of Solids and Structures***, Aveiro, Portugal, 22 Maio 2019. 17.

J.Y. COGNARD, L. S. P. D. *A modified Arcan test to analyze the behavior of composites.* ***Composites: Part A***, Brest Cedex, França, 18 Outubro 2010. 11.

KETUT B. PUTRA, J. P. A. J. S. ***Biaxial Mooney-Rivlin Coefficient of Silicone Sheet by Additive***. *Conference on BioManufacturing.* [S.l.]: Elsevier. 2017. p. 7.

LABORATÓRIOS TORK. **TORK**. Disponivel em: <https://laboratorios-tork.com.br/servicos/testes-em-materiais/ensaio-de-tracao/>. Acesso em: 3 Dezembro 2020.

LUIS FERNANDO PUENTE MEDELLÍN, J. Á. D. D. L. P. *Design of a biaxial test module for uniaxial testing machine.* ***Materials Yoday: Proceedings***, Salamanca, México, 2016. 10.

MACUE, T. J. Forbes. **Site da revista Forbes**, 2020. Disponivel em: <https://www.forbes.com/sites/tjmccue/2020/05/08/additive-manufacturing-industry-grows-to-almost-12-billion-in-2019/?sh=398e4a7c5678>. Acesso em: 3 Dezembro 2020.

MEDELLIN L. F. P, ELÍAS V., GARCÍA A. J. B, GÓMEZ P., PEÑA J. ***ON THE IMPLEMENTATION OF FEA FOR THE DESIGN AND DEVELOPMENT OF A NEW BIAXIAL TENSILE TEST FIXTURE FOR UNIAXIAL TESTING MACHINE: A***

VALIDATION FOR CRUCIFORM TEST SPECIMENS. J**ournal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 2019.

MINGLIANG JIANG, R. L. S. A. B. R. A. D. F. *A versatile biaxial testing platform for soft tissues.* ***Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials***, Hefei, China, 19 Outubro 2020. 21.

MONFERRATO. **Monferrato**. Disponivel em: <https://monferrato.com.br/o-que-e-um-material-ductil/>. Acesso em: 3 Dezembro 2020.

NHA UYEN HUYNH, J. S. A. B. . A. V. K. G. Y. *Property-map of epoxy-treated and as-printed polymeric additively manufactured materials.* ***International journal of mechanical sciences***, São Diego, USA, 20 Maio 2020. 9.

P. HAO, I. U. D. S. P. *Development of Modified Arcan Fixture for biaxial loading response of.* ***Polymer testing***, Amiens, França, 8 Outubro 2019. 10.

PROGRESS IN MATERIALS SCIENCE; ***ScienceDirect.*** Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079642520300025>. Acesso em: 15 Junho 2021.

R. GHANDRIZ, K. H. J. L. *Extended finite element method (XFEM) modeling of fracture in additively*. ***Additive manufacturing***, Massachussets, USA, 14 Novembro 2219. 9.

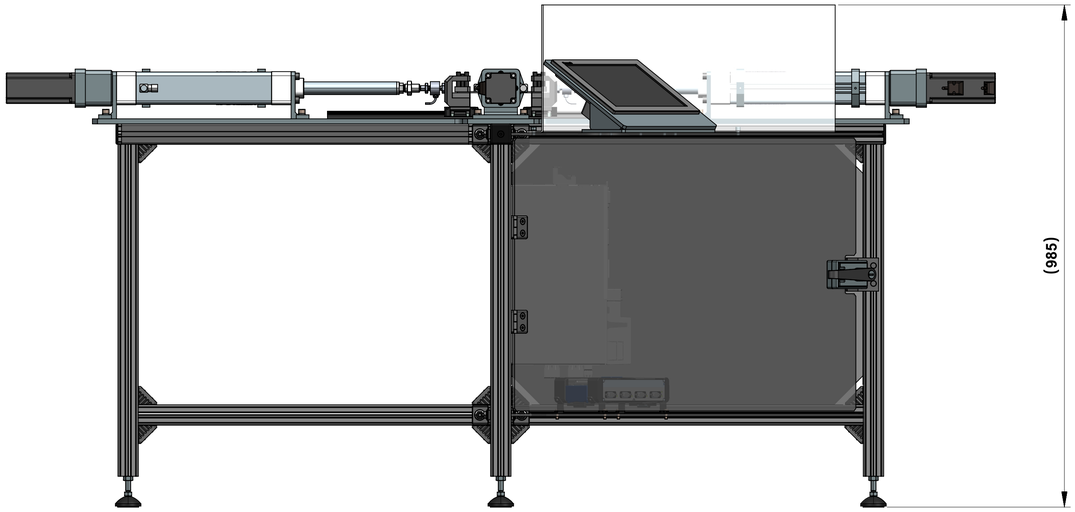
RECENT DEVELOPMENTS IN POLYMERS/POLYMER NANOCOMPOSITES FOR ADDITIVE MANUFACTURING, ***ScienceDirect****.* Acesso em: 18 Junho 2021.

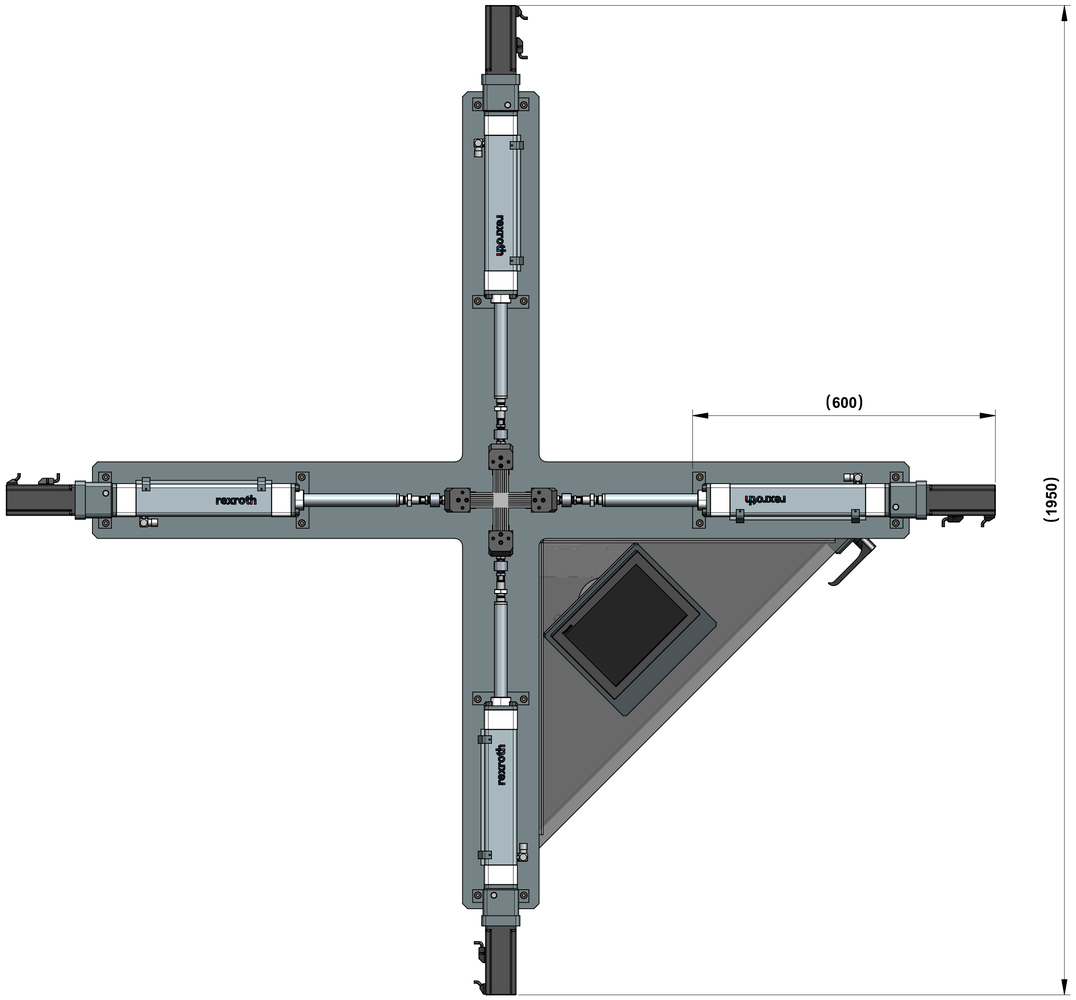
TEAM PIPEFY. Blog Pipefy. ***Pipefy***, 2020. Disponivel em: <https://www.pipefy.com/pt-br/blog/matriz-decisao/>. Acesso em: 3 Desembro 2020.

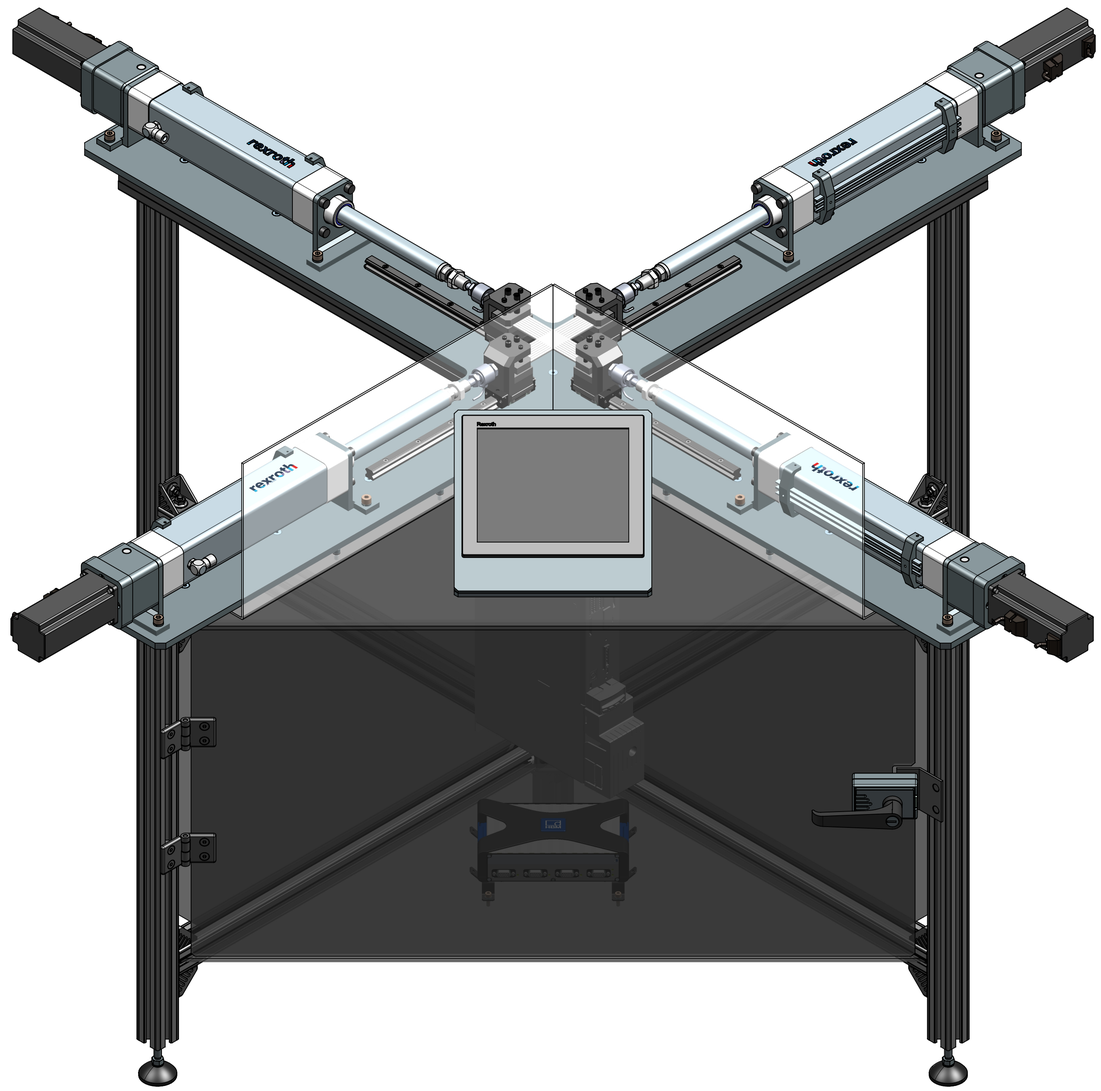
UPLOAD de Metalúrgica Industrial. **Metalúrgica industrial**, 2019. Disponivel em: <http://www.metalurgistaindustrial.com.br/adm/upload/EngMetais/2019611213740s.pdf>. Acesso em: 3 Dezembro 2020.

***WHAT IS A PLANAR BIAXIAL TEST*.** Disponível em: https://www.testresources.net/applications/test-types/planar-biaxial-test/. Acesso em: 18 Junho 2021.

ANEXO A – DETALHAMENTO DO EQUIPAMENTO

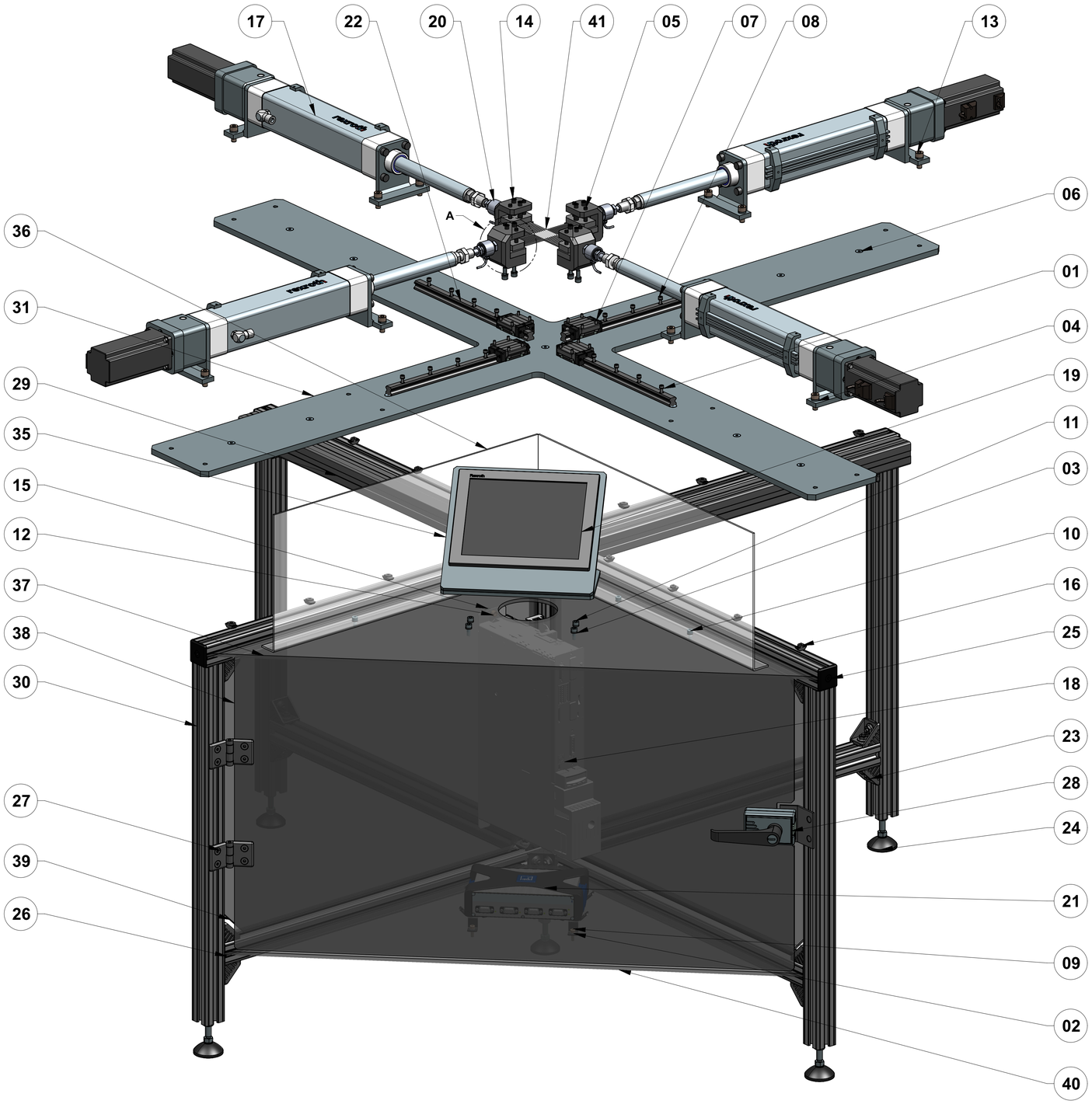




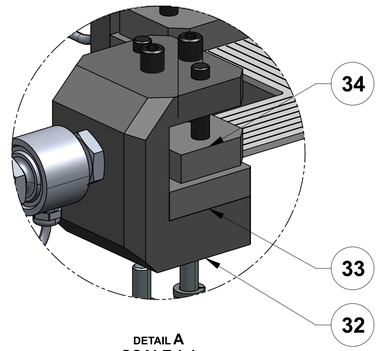


SCALE 1:4

FEI	Título: Vista Isométrica
Código: Tractus BT-01	Escala: 1:6
Material: -	Qtde.: -
Data: 21/06/2021	Página 1
Tol. não espec. +/- 0,1 mm	Tol. ang. não espec. +/- 0,5º



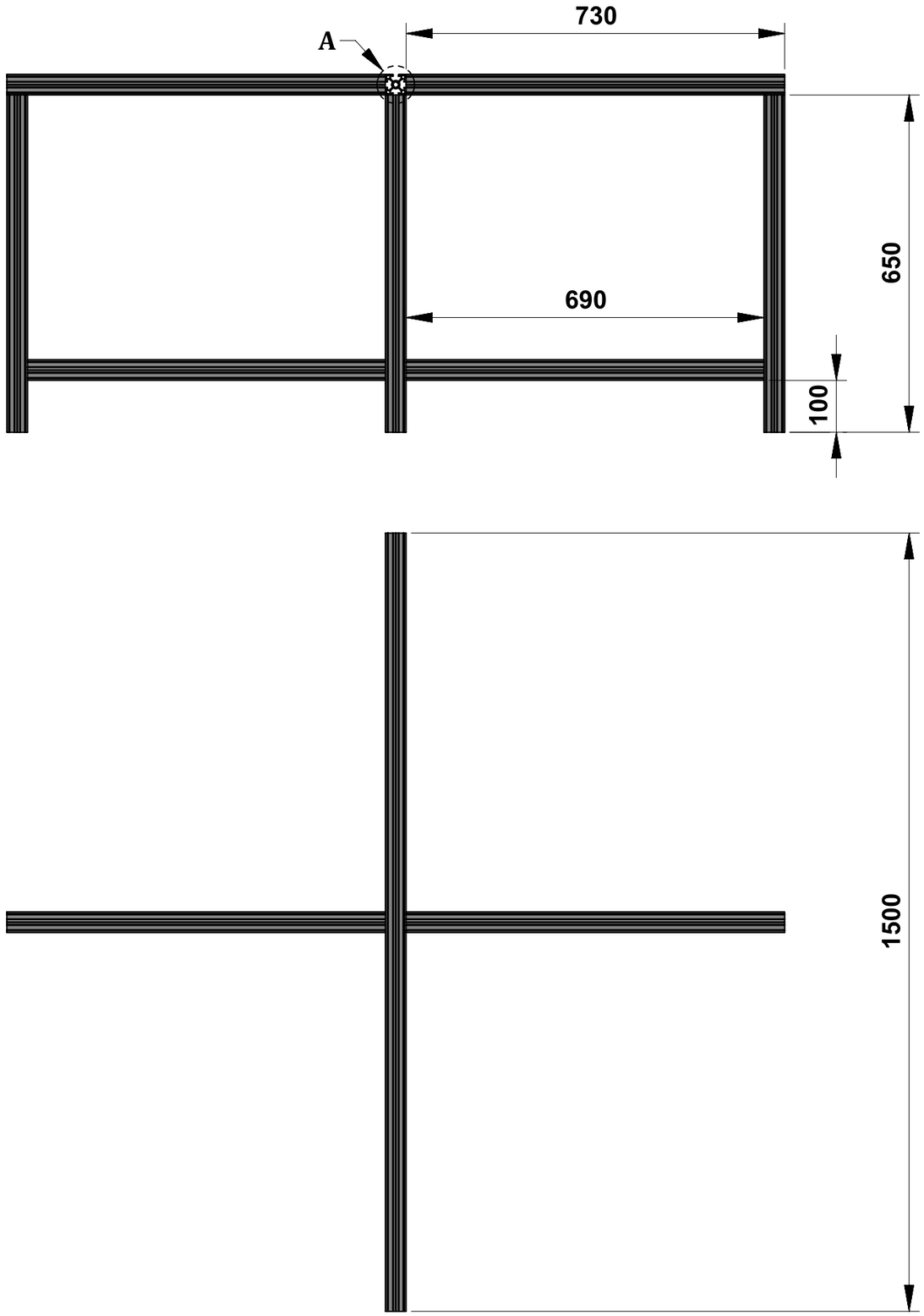
Item Nº	Fabricante	Descrição	Qntd
01	-	Arruela de Pressão DIN 127 M4	20
02	-	Arruela de Pressão DIN 127 M5	4
03	-	Arruela de Pressão DIN 127 M6	18
04	-	Arruela de Pressão DIN 127 M8	16
05	-	Pino de Guia DIN 7979 Ø6 X 30	8
06	-	Parafuso Allen Cabeça Escareada DIN 7991 M6 X 20	17
07	-	Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica DIN 912 M4 X 15	16
08	-	Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica DIN 912 M4 X 20	20
09	-	Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica DIN 912 M5 X 15	4
10	-	Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica DIN 912 M6 X 12	4
11	-	Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica DIN 912 M6 X 15	12
12	-	Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica DIN 912 M6 X 20	2
13	-	Parafuso Allen Cabeça Cilíndrica DIN 912 M8 X 20	16
14	-	Parafuso Allen Sem Cabeça DIN 913 M8 X 30	8
15	-	Porca Parlock DIN 985 M6	2
16	-	Porca T p/ Slot 10 mm - M6	17
17	Bosch Rexroth	Atuador Eletromecânico EMC-050-NN2 - 200 mm	4
18	Bosch Rexroth	Fonte/Controladora HCS/CSB	1
19	Bosch Rexroth	Panel PC VR3 - 15"	1
20	HBM	Célula de Carga U9C I 20kN	4
21	HBM	Módulo de Aquisição Universal QuantumX MX440B	1
22	OBR	Guia Linear OBR-A-15E / Trilho 300 mm	4
23	-	Cantoneira p/ Perfil 40 X 40	32
24	-	Pé de Nivelamento p/ Perfil 40 X 40	5
25	-	Capa de Fechamento p/ Perfil 40 X 40	4
26	-	Suporte de Chapa p/ Perfil c/ Slot 10 mm - 6600 mm	1
27	-	Dobradiça p/ Perfil 40 X 40	2
28	-	Fecho c/ Trava p/ Perfil 40 X 40	1
29	-	Duto Passa Cabo p/ Perfil 40 X 40 - 1360 mm	1
30	-	Estrutura em Perfis de Alumínio 40 X 40 c/ Slot 10 mm	1
31	-	Chapa "Cruz"	1
32	-	Suporte "C"	4
33	-	Mordente Superior	4
34	-	Mordente Inferior	4
35	-	Suporte IHM	1
36	-	Proteção Acrílico	2
37	-	Chapa Estrutura Fechada Superior	1
38	-	Chapa Estrutura Fechada Frontal	1
39	-	Chapa Estrutura Fechada Lateral	2
40	-	Chapa Estrutura Fechada Inferior	1
41	-	Corpo de Prova	1

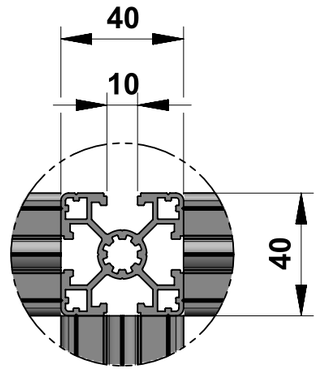


DETAIL A
SCALE 1:1

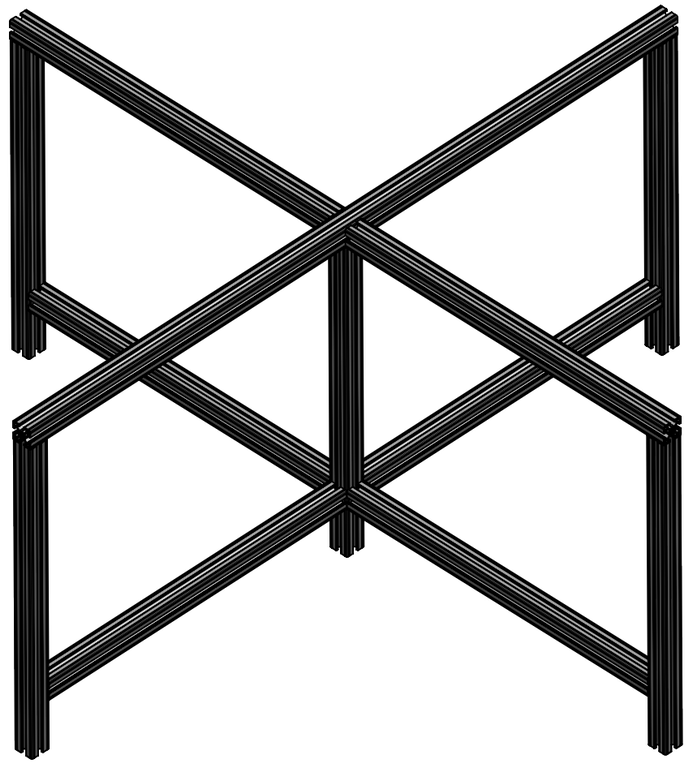
FEI	Título: Lista de Material
Código: Tractus BT-01	Escala: 1:4
Material: -	Qtde.: -
Data: 21/06/2021	Página 2
Tol. não espec. +/- 0,1 mm	Tol. ang. não espec. +/- 0,5º

A1





DETAIL A
SCALE 1:2

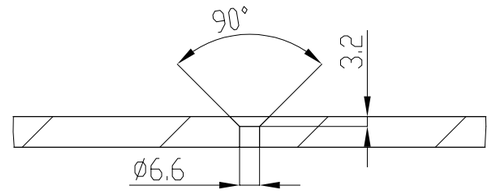


Perfil de Alumínio 40 X 40 - Slot 10 mm	
Comprimento (mm)	**Qtnd.**
650	5
690	4
730	2
1500	1

FEI	*Título:* *Estrutura em Perfis*
Código: *40x40 - R10*	*Escala:* *1:10*
Material: *Alumínio*	*Qtde.:* *-*
Data: *21/06/2021*	*Página* *3*
Tol. não espec. +/- 0,1 mm	*Tol. ang. não espec. +/- 0,5º*

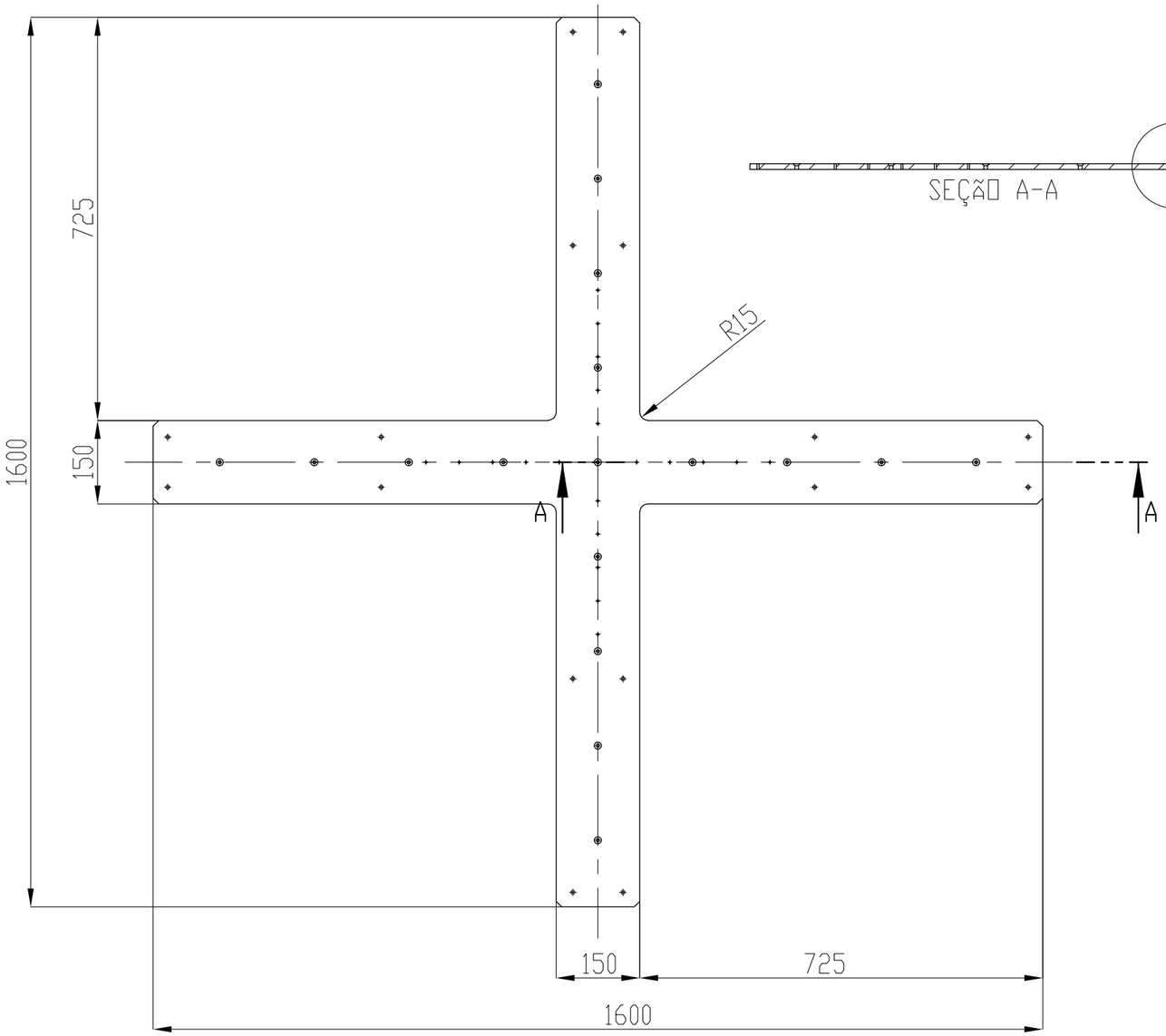
A3

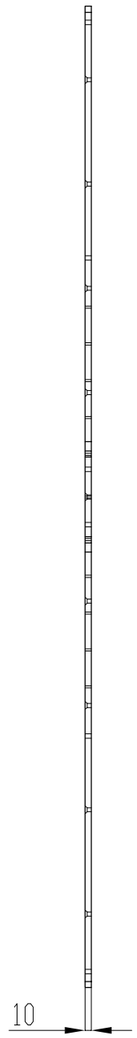
31 N8



DETALHE B
ESCALA 1 : 2

SEÇÃO A-A

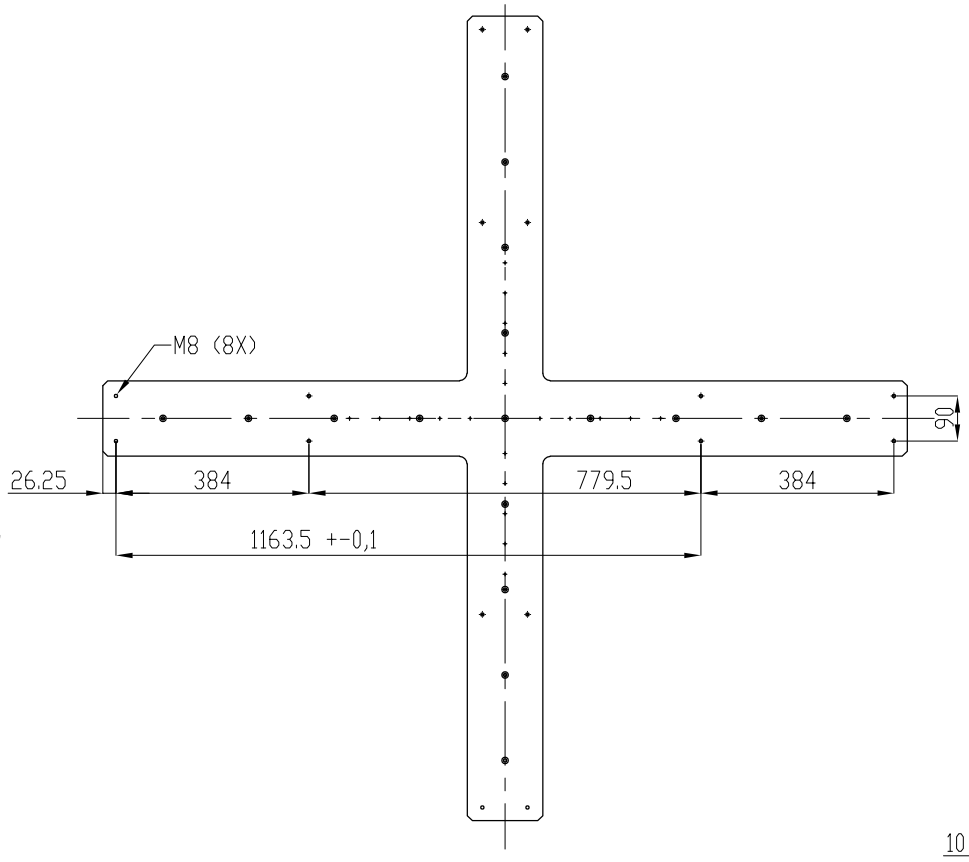


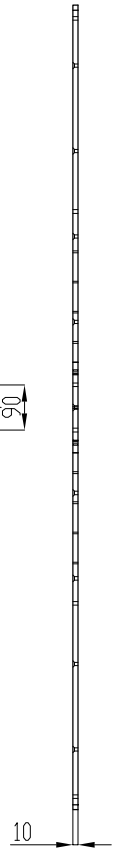


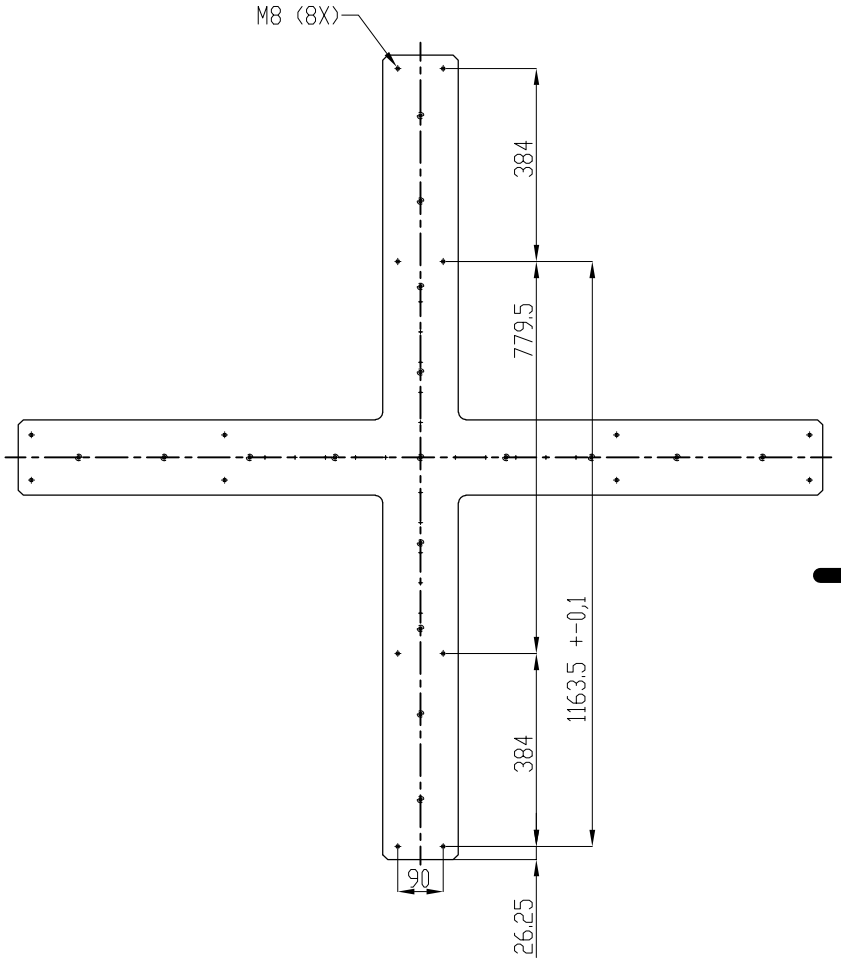
FEI	Título: CHAPA CRUZ
Código:CHCZ-01	Escala: 1:10
Material: AÇO ABNT 1045	Qtde.:1
Data:21/06/21	Página 4
Tol. não espec. +/- 0,1 mm	**Tol. ang. não espec. +/- 0,5º**

A3

31 N8



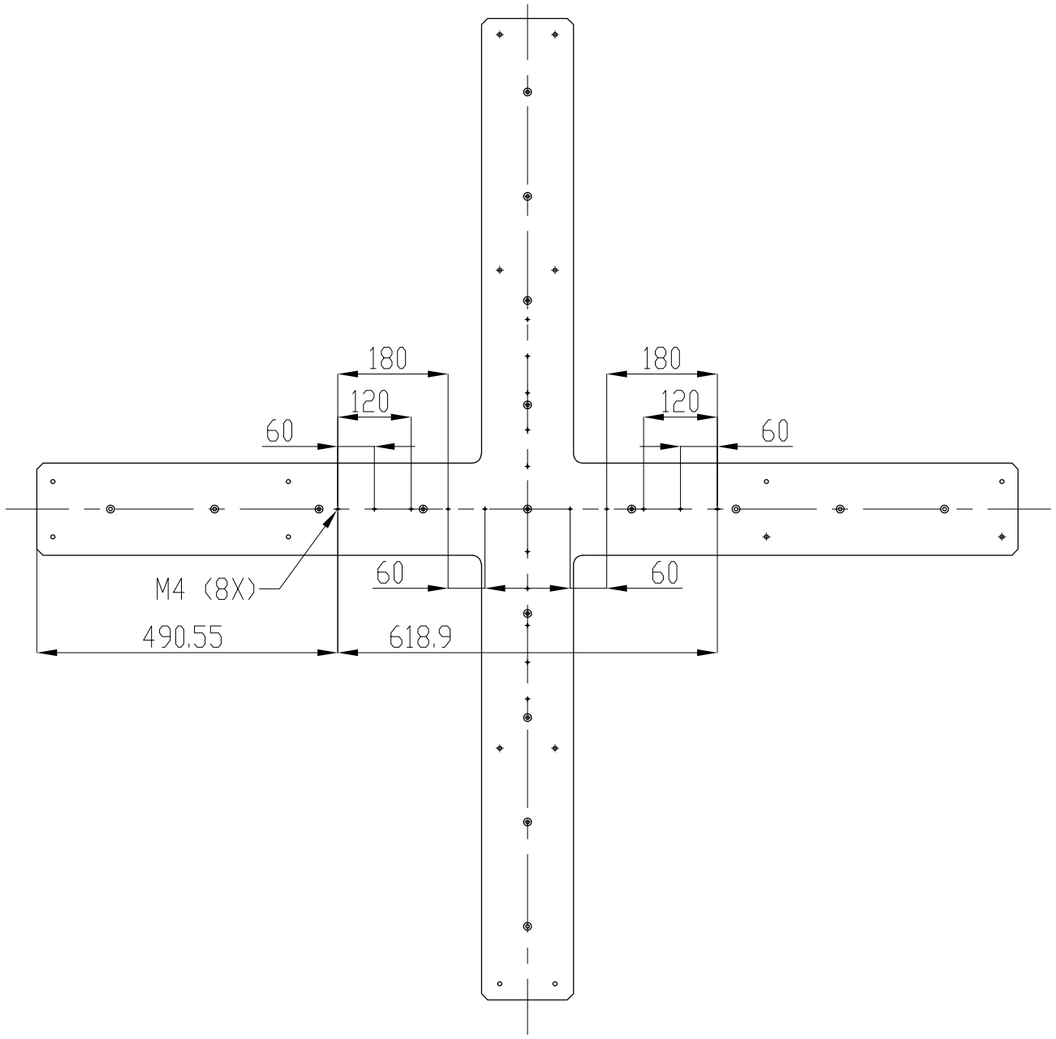


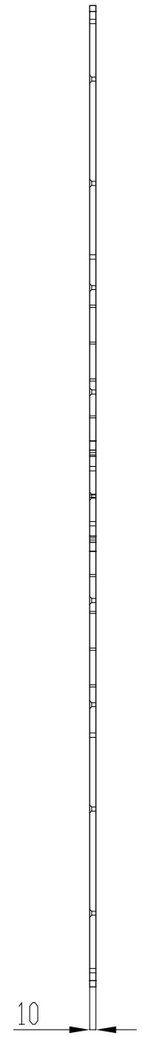


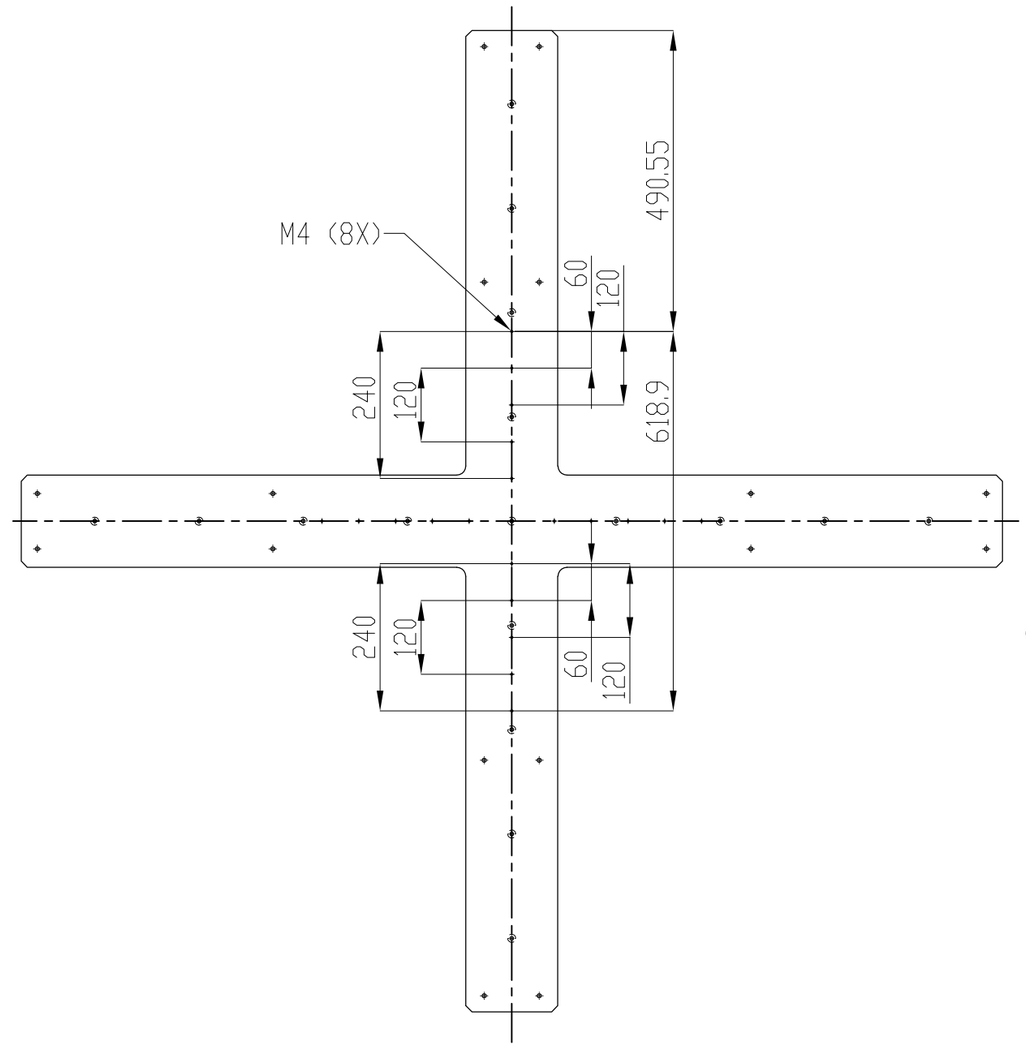
FEI	Título: CHAPA CRUZ (ATUADOR)
Código:CHCZ-01	Escala:1:10
Material: ABNT 1045	Qtde.:1
Data: 21/06	Página 5
Tol. não espec. +/- 0,1 mm	Tol. ang. não espec. +/- 0,5º

A3

N8



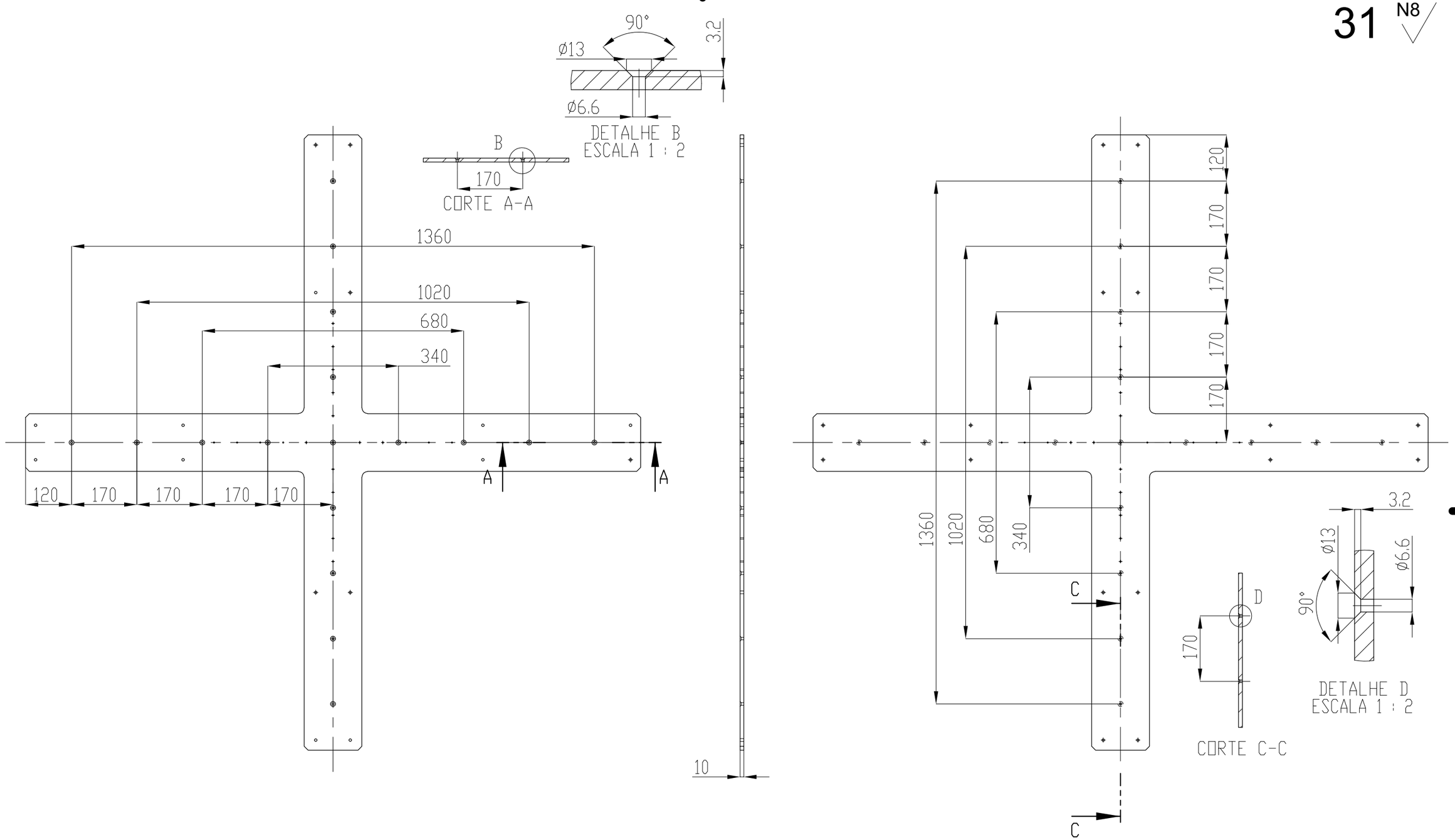




FEI	Título: CHAPA CRUZ (GUIA)
Código:CHCZ-01	Escala:1:10
Material:AÇO ABNT 1045	Qtde.:1
Data:21/06/21	Página 6
Tol. não espec. +/- 0,1 mm	**Tol. ang. não espec. +/- 0,5º**

A3

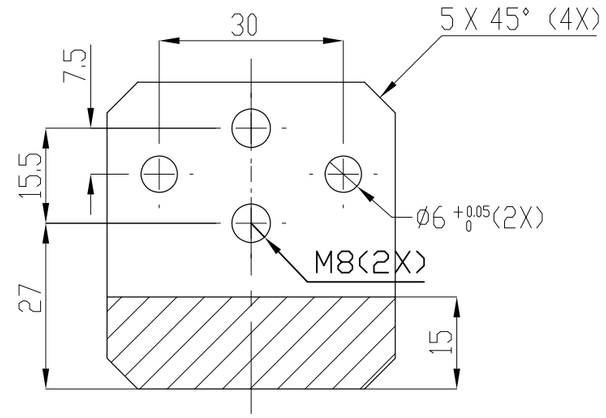
N8



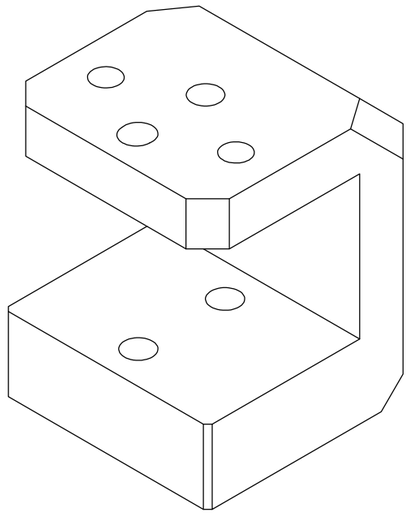
FEI	Título: CHAPA CRUZ (ESTRUTURA)
Código:CHCZ-01	Escala: 1:10
Material: AÇO ABNT 1045	Qtde.:1
Data:21/06/21	Página 7
Tol. não espec. +/- 0,1 mm	**Tol. ang. não espec. +/- 0,5º**

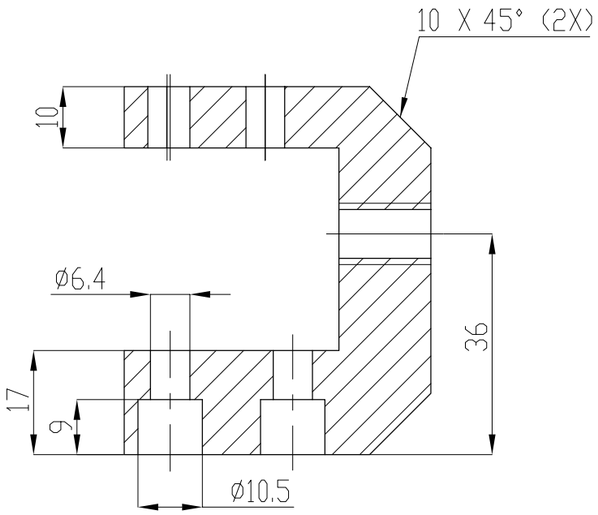
A3

32 N8

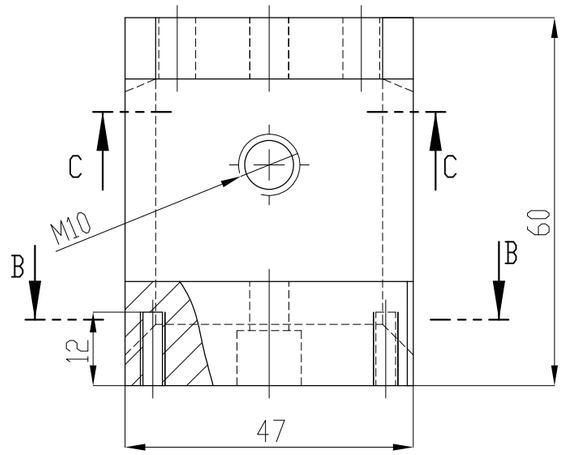


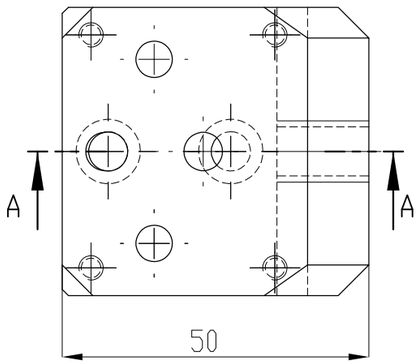
SEÇÃO C-C

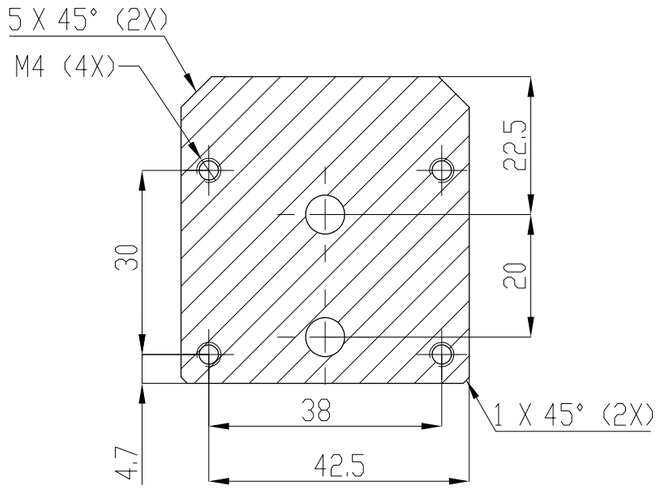




CORTE A-A



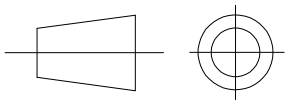




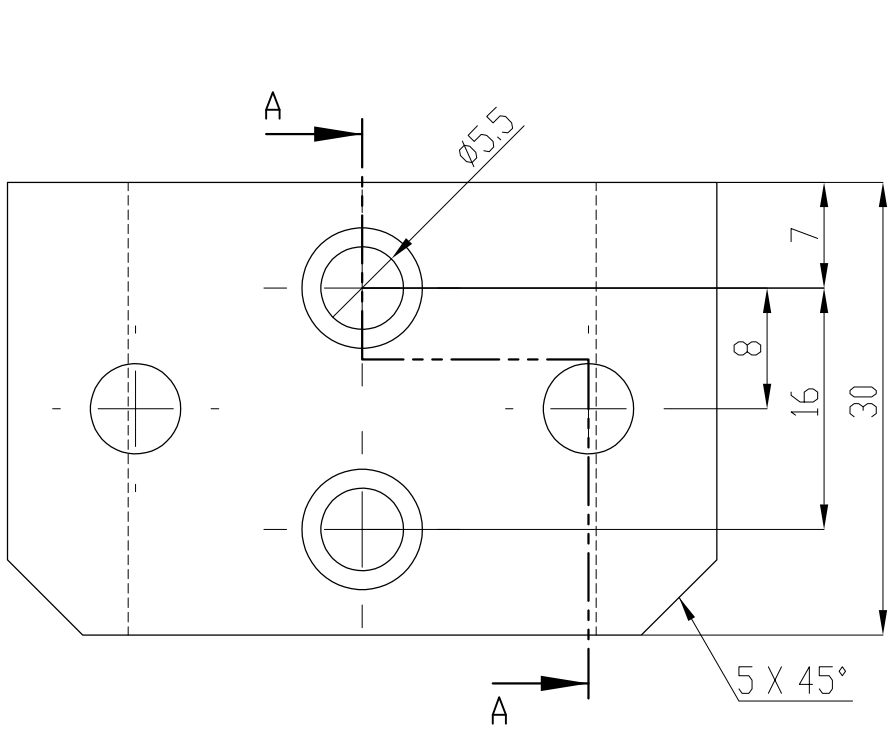
SEÇÃO B-B

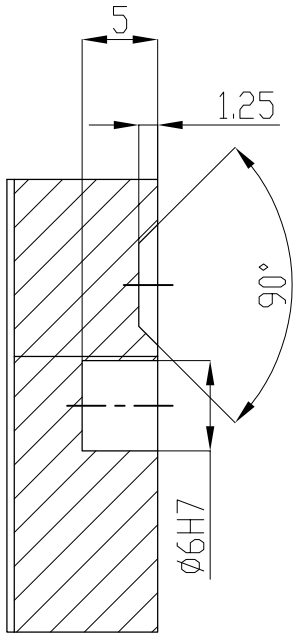
FEI	Título: SUPORTE "C"
Código:SPTC-01	Escala: 1:1
Material: AÇO ABNT 1045	Qtde.:4
Data:21/06/21	Página 8
Tol. não espec. +/- 0,1 mm	**Tol. ang. não espec. +/- 0,5º**

A3

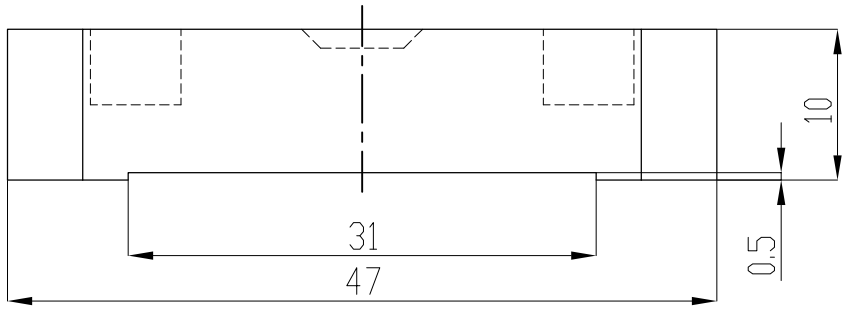


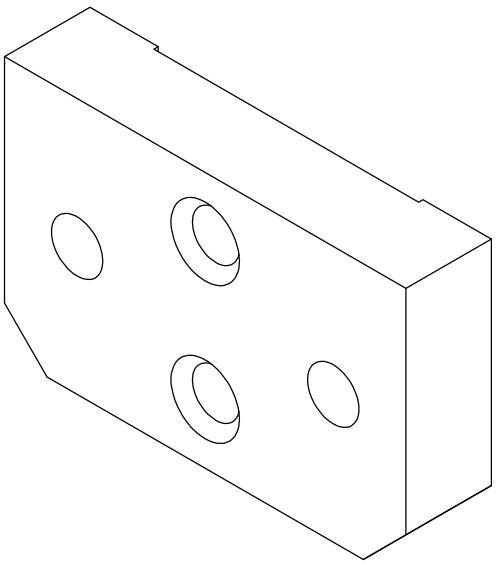
33 N8



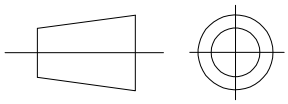


SEÇÃO A-A

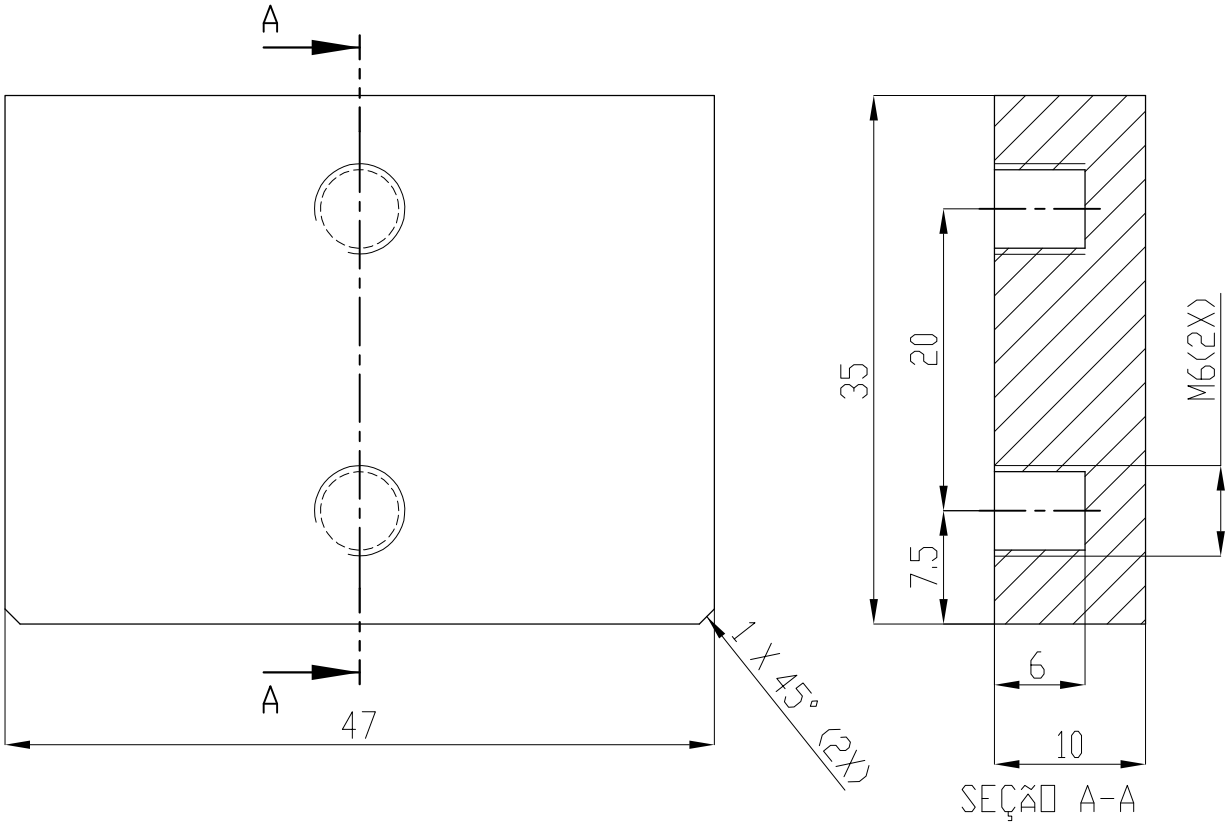


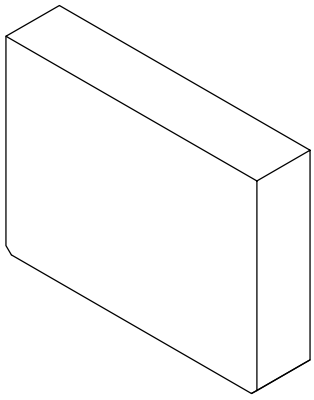


FEI	Título: MORDENTE SUPERIOR
Código:MDSP-01	Escala:2:1
Material:AÇO ABNT 1045	Qtde.: 4
Data :21/06/21	Página 9
Tol. não espec. +/- 0,1 mm	Tol. ang. não espec. +/- 0,5º



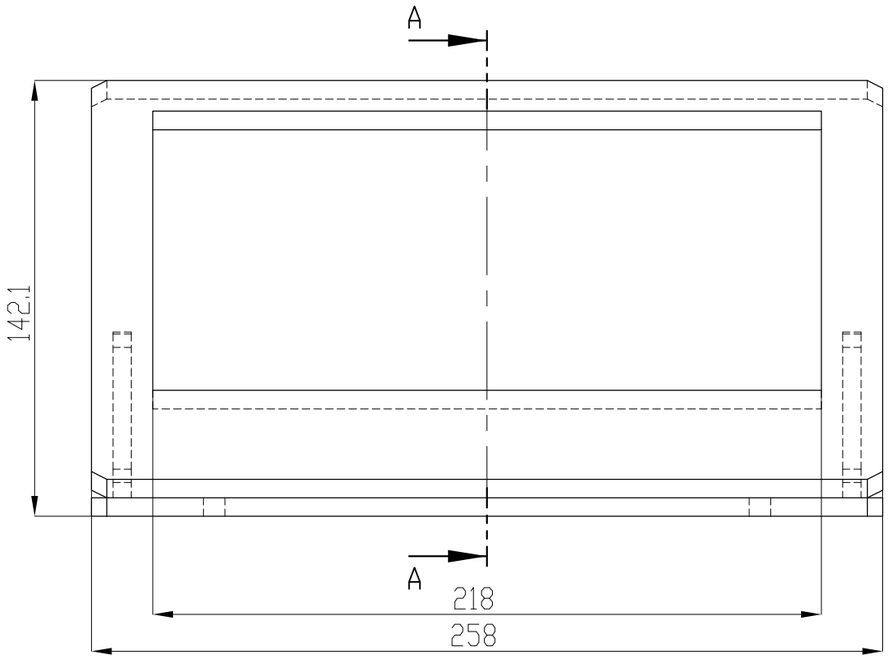
34 N8

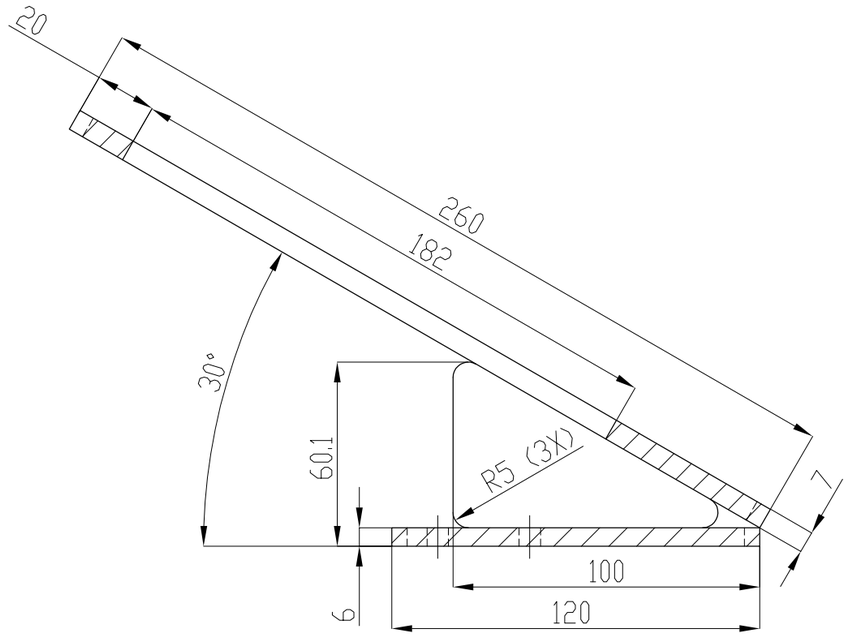




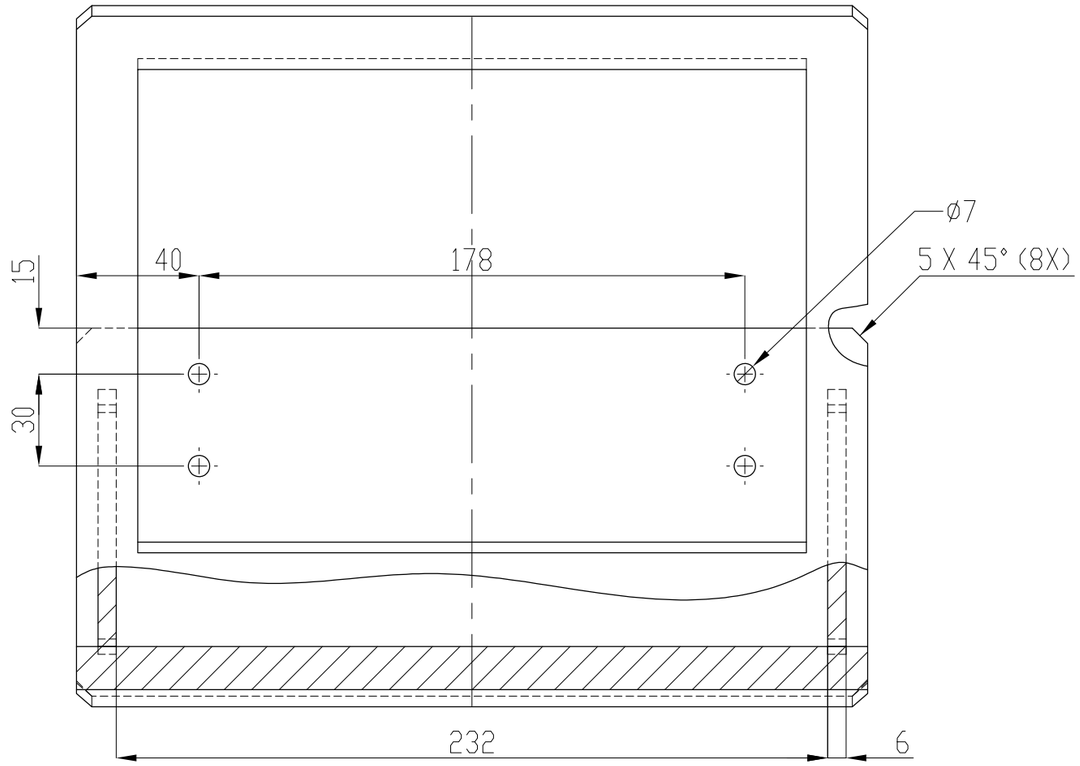
FEI	Título: MORDENTE INFERIOR
Código:MDIF-01	Escala:2:1
Material:AÇO ABNT 1045	Qtde.: 4
Data :21/06/21	Página 10
Tol. não espec. +/- 0,1 mm	Tol. ang. não espec. +/- 0,5º

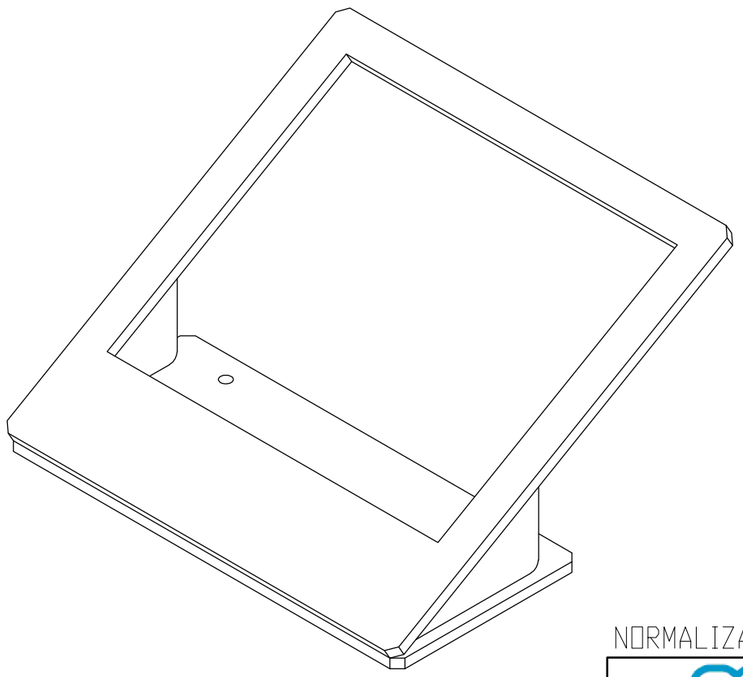
35 N8





CORTE A-A



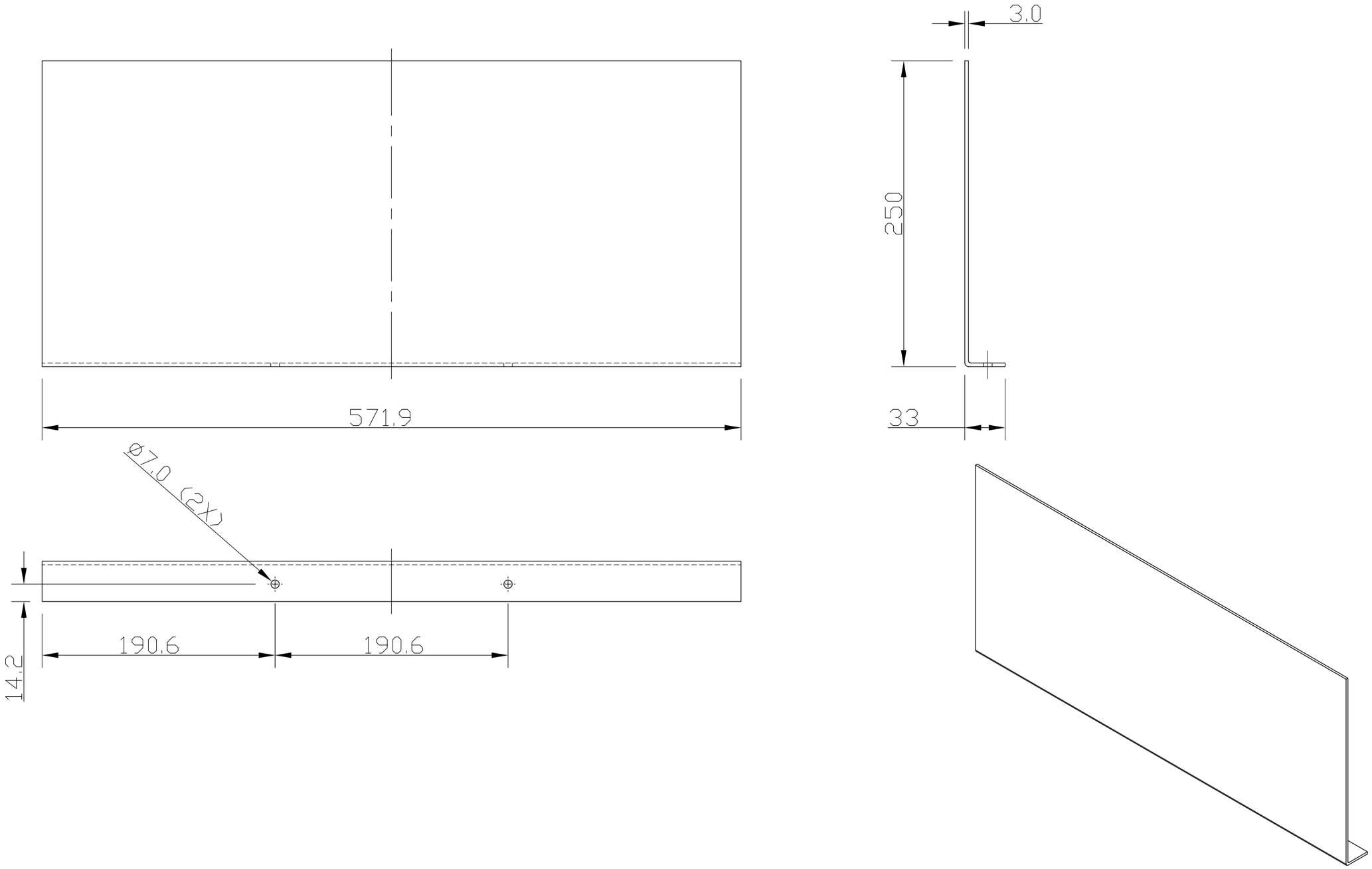


NORMALIZAR ESTRUTURA SOLDADA

FEI	Título: SUPORTE IHM
Código:SPIH-01	Escala:1:2
Material:AÇO ABNT 1020	Qtde.:1 PÇS
Data:21/06/2021	Página 11
Tol. não espec. +/- 0,1 mm	**Tol. ang. não espec. +/- 0,5º**

A3

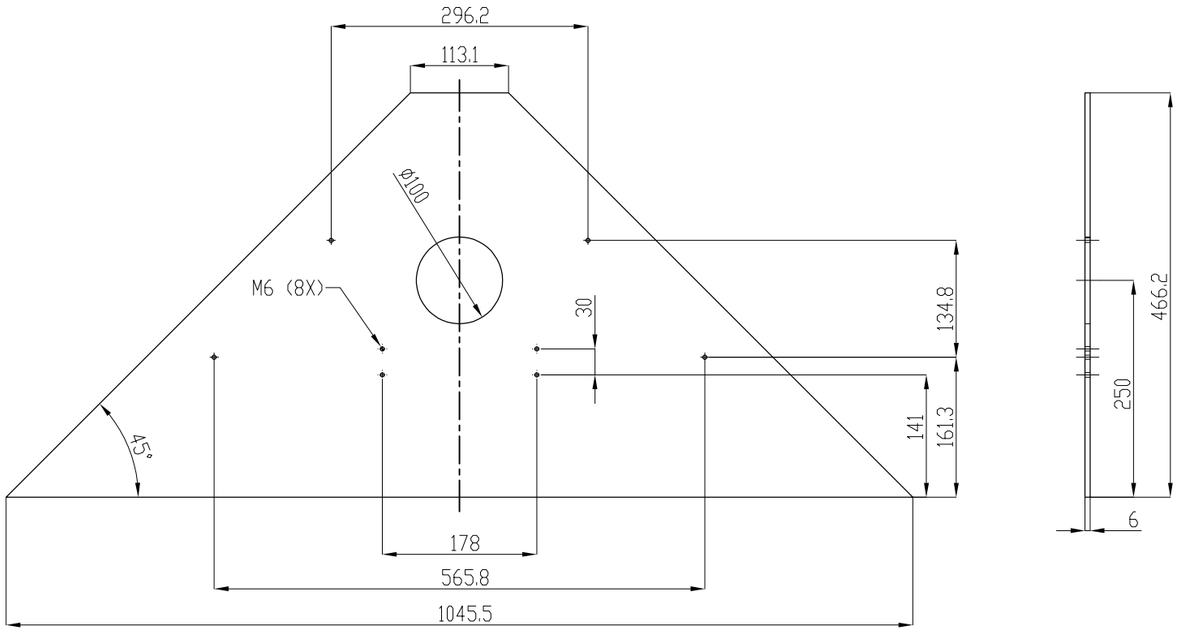
36 N8

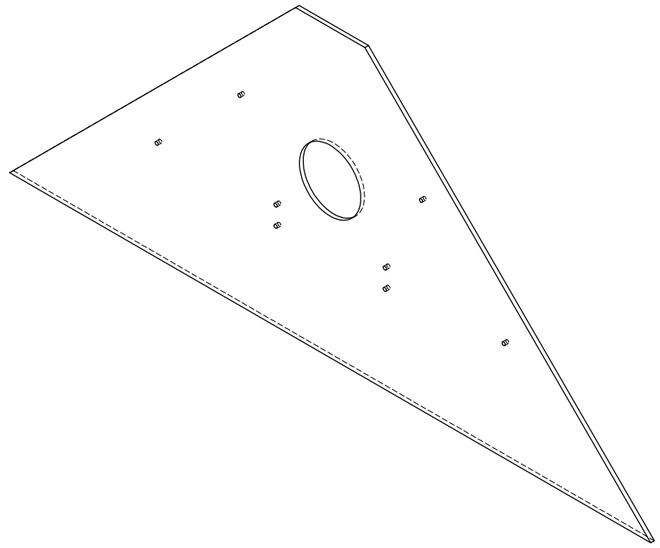


FEI	Título: ACRILICO DE PROTEÇÃO
Código:	Escala:1:2
Material:ACRILICO	Qtde.:2 PÇS
Data:21/06/2021	Página 12
Tol. não espec. +/- 0,1 mm	**Tol. ang. não espec. +/- 0,5º**

A3

37 N8

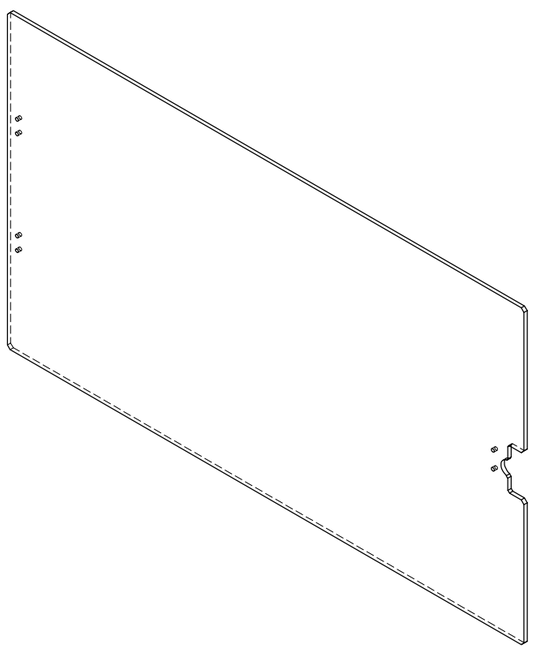


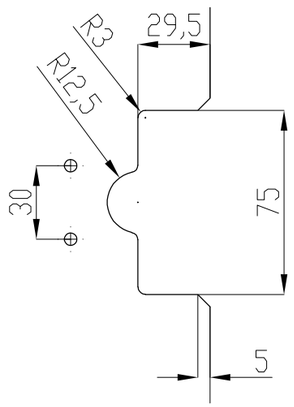


FEI	Título: CHAPA ESTRUTURA SUP.
Código:CHSP-01	Escala:1:10
Material: AÇO ABNT 1020	Qtde.: 1
Data:21/06/21	Página 13
Tol. não espec. +/- 0,1 mm	**Tol. ang. não espec. +/- 0,5º**

A4

38 N8



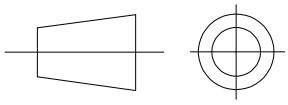


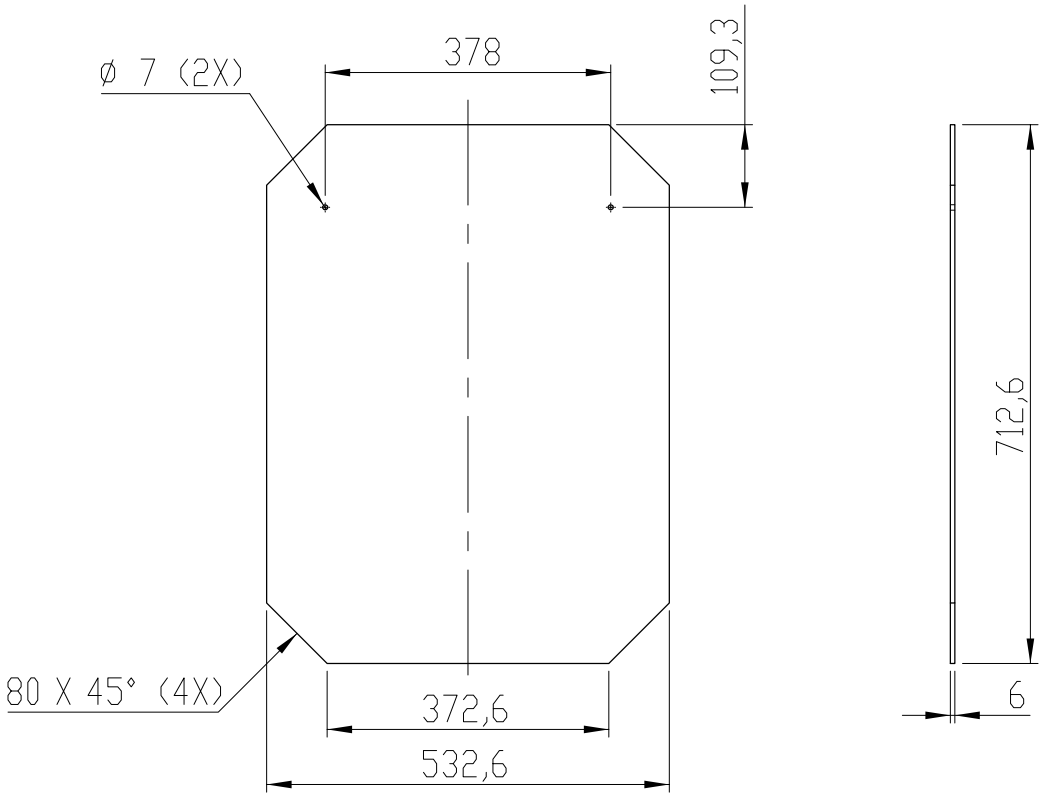
DETALHE A
ESCAL 1:5

FEI	Título: PORTA
Código:PTGR-01	Escala:1:10
Material:AÇO ABNT 1020	Qtde.:1 PÇS
Data:21/06/2021	Página 14
Tol. não espec. +/- 0,1 mm	**Tol. ang. não espec. +/- 0,5º**

A3

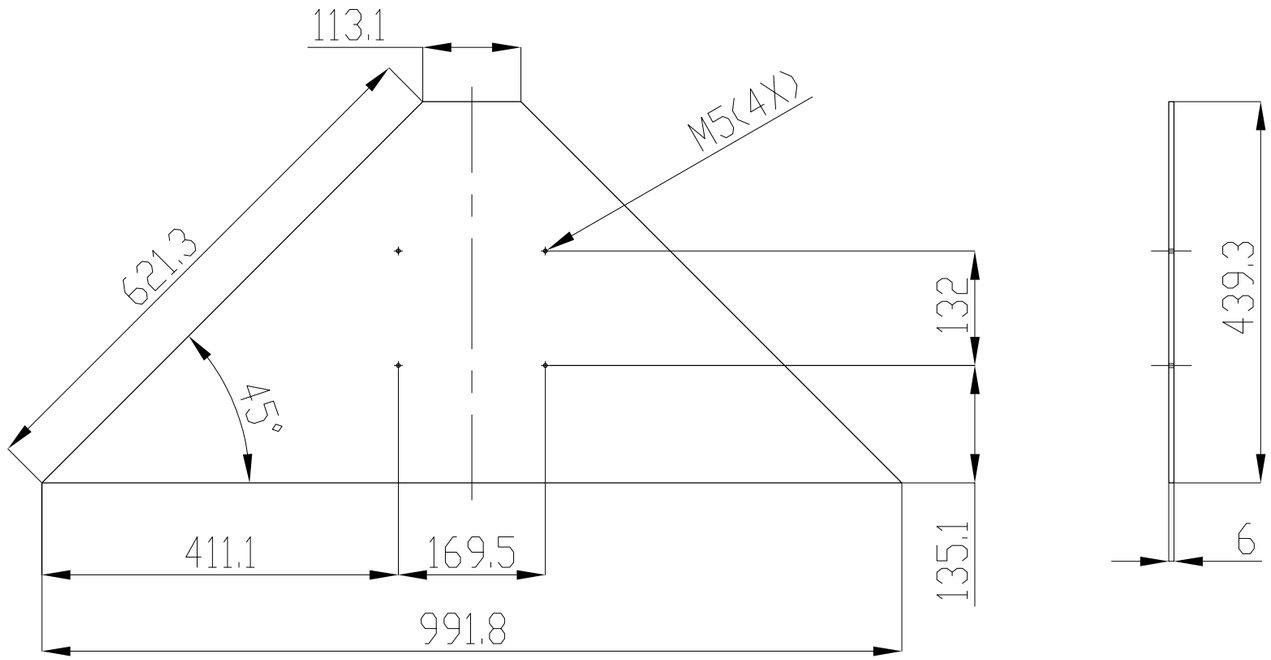
39 N8





FEI	Título: CHAPA LATERAL
Código:CHPT-01	Escala:1:10
Material:AÇO ABNT 1020	Qtde.: 1
Data :21/06/21	Página 15
Tol. não espec. +/- 0,1 mm	Tol. ang. não espec. +/- 0,5º

40 N8



FEI	Título: CHAPA ESTRUTURA INF
Código: CHIF-01	Escala: 1:10
Material:AÇO ABNT 1020	Qtde.: 1
Data: 21/06/21	Página 16
Tol. não espec. +/- 0,1 mm	Tol. ang. não espec. +/- 0,5º

A4