

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE FEDERAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – FEMEC

LEONARDO DA SILVA ALVES

**PROJETO MECÂNICO DE MINIMÁQUINA-FERRAMENTA MULTIFUNCIONAL DE
PRECISÃO DE GRANITO SINTÉTICO**

UBERLÂNDIA

2022

LEONARDO DA SILVA ALVES

**PROJETO MECÂNICO DE MINIMÁQUINA-FERRAMENTA MULTIFUNCIONAL DE
PRECISÃO DE GRANITO SINTÉTICO**

Projeto de fim de curso apresentado como requisito para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi

UBERLÂNDIA

2022

LEONARDO DA SILVA ALVES

**PROJETO MECÂNICO DE MINIMÁQUINA-FERRAMENTA MULTIFUNCIONAL DE
PRECISÃO DE GRANITO SINTÉTICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia Mecânica - UFU.

Uberlândia, 28 de abril de 2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi

Prof. Dr. Alexandre Zuquete Guarato

AGRADECIMENTOS

Agradeço a **DEUS**, pela vida que me deste e por todo o amparo, forças, bençãos e provações que me guiaram até esta conquista.

À **SANTÍSSIMA VIRGEM MARIA** mãe de Deus que nos momentos mais difíceis de minha vida foi e é o consolo e conforto que preciso.

Aos meus **PAIS**, Ademar José Alves e Noemia Juvelina da Silva Alves por serem os pilares que sustentam minha vida e jornada. Sem seus sacrifícios e amor jamais teria alcançado essa conquista.

Ao meu **ORIENTADOR** Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi, por todo conhecimento e experiência transmitido ao decorrer do desenvolvimento deste trabalho. Agradeço por ter sido fundamental na minha graduação e por todo esforço despendido para que esse trabalho acontecesse.

Aos **PROFESSORES DA FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA (FEMEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UERLANDIA (UFU)**, por toda transmissão de conhecimento realizada durante minha formação.

A **EQUIPE CERRADO BAJA SAE** pela oportunidade, conhecimento e experiência que me proporcionou durante minha graduação. Agradeço aos amigos e colegas que fiz durante minha passagem, com vocês tudo se tornou mais leve.

A **EMPRESA** Autodesk por fornecer de forma gratuita a licença de uso do programa Autodesk Fusion 360® para fins acadêmicos.

Agradeço a **FAPEMIG** (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo auxílio financeiro a pesquisa (APQ-01759-17), tornando possível a realização deste trabalho.

Agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, tornaram o sonho de um garoto de 10 anos possível.

RESUMO

O projeto de uma minimáquina CNC multifuncional de precisão feita de granito sintético surgiu para suprir à demanda por sistemas de fabricação híbridos, integrando processos subtrativos e aditivos em uma única máquina-ferramenta para atender aos requisitos avançados de fabricação da Indústria 4.0. Este estudo teve como objetivo desenvolver uma abordagem evolutiva de projeto estrutural para uma minimáquina-ferramenta de granito sintético, com base na pesquisa de Rodrigues (2022). Metodologia de Projeto foi aplicada no projeto mecânico estrutural. O software *Fusion 360*[®] CAD-CAE foi usado para modelagem e Análise de Elementos Finitos (FEA) da estrutura de granito sintético e dos principais sistemas lineares mecânicos. Os requisitos de projeto foram: estrutura de portal simétrico em granito sintético; faixas nominais dos eixos de 400 mm x 400 mm x 400 mm; 100 N/μm de rigidez estática; três eixos lineares ortogonais com guias e fusos de precisão de elementos recirculantes; um cabeçote vertical; previsão de superfícies funcionais para atualizações futuras com a adição de quarto e quinto eixos, motores lineares eletromagnéticos, guias aerostáticas e cabeçotes adicionais; otimização geométrica para minimizar custos de material, projeto de molde, insertos metálicos, construção de molde, fundição das estruturas de granito sintético, desmoldagem, pós-processamento, montagem e alinhamento das superfícies funcionais. Os resultados incluem dez protótipos evolutivos, sendo o último detalhado e analisado estruturalmente, mostrando que foi possível obter uma estrutura multifuncional de granito sintético com menores custos de fabricação, montagem e manutenção. O projeto exigirá otimizações de rigidez e redução de massa que serão realizadas em trabalhos futuros, dando continuidade ao Projeto de Pesquisa FAPEMIG APQ-01759-17.

Palavras-chave: Minimáquina-ferramenta. Máquina multifuncional. Metodologia de projeto. Usinagem de precisão. Usinagem de ultraprecisão. Projeto mecânico de máquina. Granito sintético. Análise de elementos finitos.

ABSTRACT

The design of a precision multifunctional CNC mini-machine tool made of synthetic granite has emerged to address the demand for hybrid manufacturing systems, integrating subtractive and additive processes within a single-machine tool to meet advanced manufacturing requirements in Industry 4.0. This study aimed to develop an evolutive structural design approach for a synthetic granite mini-machine tool, building upon the research of Rodrigues (2022). Design Methodology was applied in the structural mechanic design. Fusion 360® CAD-CAE software was used for modeling and Finite Elements Analysis (FEA) of the synthetic granite structure and the major mechanical linear systems. The design requirements were: symmetric portal structure made of synthetic granite; axes ranges of 400 mm x 400 mm x 400 mm; 100 N/ μ m static stiffness; three orthogonal linear axes with precision guideways and ballscrews of recirculating elements; a vertical spindle; prediction of functional surfaces for future updates with the addition of fourth and fifth axes, electromagnetic linear motors, aerostatic guideways, and additional spindles; geometric optimization for minimizing material costs, mold design, metallic inserts, mold construction, casting of the synthetic granite structures, demolding, post-processing, and assembly and alignment of the functional surfaces. The results include ten evolutive prototypes, being the last one structurally detailed and analyzed, showing that it was possible to achieve a multifunctional structure of synthetic granite with lower fabrication, assembly, and maintenance costs. The design will require stiffness and mass reduction optimizations that will be carried out in future works, continuing the FAPEMIG APQ-01759-17 Research Project.

Keywords: Mini machine tool. Multifunctional-machine tool. Design Methodology. Precision machining. Ultra-precision machining. Machine design. Synthetic granite. Finite element analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Disco Rígido de computador possui componentes que são fabricados com usinagem de ultraprecisão.....	1
Figura 2.1 - Fluxograma de relações que interferem na qualidade da máquina-ferramenta.....	5
Figura 2.2 - Arranjos construtivos de máquinas-ferramentas.....	6
Figura 2.3 - A esquerda arranjo estrutural da HERMLE C650 e à direita da KERN MICRO HD.....	7
Figura 2.4 - Base da máquina-ferramenta Studer™ S11 construída de Granitan® S103.	11
Figura 2.5 - Estrutura construída de material patenteado chamado de KERN-Armorith (compósito de minério, reforçado com pesadas estruturas de metal), feita pela fabricante Kern.....	12
Figura 2.6 - Resistência à flexão e compressão do GS.	13
Figura 2.7 - Tipos de insertos e fixações de guias em estrutura de GS.	16
Figura 2.8 - Estrutura metrológica aplicada para fixar os rolamentos nas posições corretas com exatidão de alguns centésimos de milímetros. Na imagem um funcionário da Studer posiciona o gabarito metrológico manualmente.....	17
Figura 2.9 - Referências para classificação dos graus de liberdade segundo a norma ISO-230.	19
Figura 2.10 - Configuração básica típica na formação de um eixo funcional de uma máquina-ferramenta.....	20
Figura 2.11 - A direita contato do tipo esférico e à esquerda contato do tipo gótico em guias lineares.....	21
Figura 2.12 - Configuração de montagem para o máximo de exatidão e rigidez.	23
Figura 2.13 - Uso de uma guia e um lado de referência na montagem.....	23
Figura 2.14 - (a) configuração de patins móveis e (b) configuração de patins fixos. .	23
Figura 2.15 - Montagem com (a) guias externas e (b) guias internas.	23
Figura 2.16 - (a) fuso de esferas recirculantes e (b) fuso trapezoidal de deslizamento convencional.....	24
Figura 2.17 - Procedimento de seleção de fusos de esferas recirculantes.	25
Figura 2.18 - Montagem do fuso de esferas recirculantes com ambas as pontas fixadas.	26

Figura 2.19 - Exemplos de montagem de mancais em fusos de esferas recirculantes. (a) lado esquerdo com mancal fixo e lado direito com mancal suportado. (b) Ambos os lados com mancais suportados. (c) lado esquerdo com mancal fixo e lado direito livre.....	27
Figura 3.1- Fluxograma do projeto de minimáquina-ferramenta multifuncional CNC de GS.....	28
Figura 3.2 - Estrutura de referência da KERN MICRO HD do tipo portal simétrico escolhida para desenvolvimento do projeto mecânico em GS.	31
Figura 3.3 - Curva tensão-deformação do GS no ensaio de tração em máquina universal modelo Bionix brand MTS®. Composição mássica de 55 % de brita grossa (1,2 mm a 2,0 mm), 15 % de brita média (0,3 mm a 0,6 mm), 35 % de brita fina (0,1 mm a 0,2 mm) e 19 % de resina epóxi.....	33
Figura 3.4 - Curva tensão-deformação esquemática para um compósito de matriz polimérica reforçado com fibras contínuas alinhadas submetido a tensão uniaxial aplicada na direção do alinhamento.	34
Figura 3.5 - Curva tensão-deformação do GS extraída de Lovo et al. (2018). A linha tracejada vermelha representa o Estágio I e a tracejada verde o Estágio II.	35
Figura 3.6 - Conceito de estrutura portal simétrico (EPS) em perspectiva.....	38
Figura 3.7 - Componentes utilizados na (a) fixação dos motores eletromagnéticos modelo MBA20 - F e dos fusos de esferas recirculantes (b) modelo FKA20 e (c) modelo BF20.....	40
Figura 3.8 - Vista em perspectiva isométrica do motor NEMA 34, suporte do motor, mancais, fuso de esferas recirculantes e porca de esferas recirculantes.	41
Figura 3.9 - Esboço em perspectiva isométrica do primeiro protótipo da minimáquina-ferramenta com sistema cartesiano baseado na Kern Micro HD®.	43
Figura 3.10 - Esboço em perspectiva isométrica do protótipo 2 da minimáquina-ferramenta.....	44
Figura 3.11 - Estrutura base do protótipo 2 da minimáquina-ferramenta com guias e patins do eixo Y em perspectiva isométrica.....	44
Figura 3.12 - Flange XY de interligação dos sistemas lineares dos eixos X e Y em perspectiva isométrica sobre a estrutura principal.....	45
Figura 3.13 - Detalhes construtivos da estrutura X.	45
Figura 3.14 - Detalhe do spindle e sistema linear do eixo Z do segundo protótipo em perspectiva isométrica.	46

Figura 3.15 - Espaços considerados para integração dos sistemas de potência dos eixos (a) X, (b) Y e (c) Z.....	47
Figura 3.16 - Mancais, fusos de esferas recirculantes, porcas e suportes das porcas dos eixos (a) X, (b) Y e (c) Z em perspectiva isométrica do segundo protótipo.	47
Figura 3.17 - Suporte das porcas dos fusos de esferas recirculantes em perspectiva isométrica.....	48
Figura 3.18 - Vista (a) frontal, (b) lateral esquerda, (c) superior e (d) perspectiva isométrica do terceiro protótipo da minimáquina-ferramenta.	48
Figura 3.19 - Estrutura base do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta com guias, patins, mancais, fuso, porca, suporte da porca e motor eletromagnético do eixo Y em perspectiva isométrica.	49
Figura 3.20 - Estrutura X do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta com patins do eixo Z em perspectiva isométrica. O patim superior esquerdo foi ocultado para mostrar as furações de montagem na estrutura.	50
Figura 3.21 Estrutura X do Protótipo 3 da minimáquina-ferramenta. Vista Inferior mostrando os mancais, fuso, porca, suporte da porca, suporte do motor, motor eletromagnético, guia, patins e acessos de montagem. Uma guia foi ocultada para apresentar os furos de montagem na estrutura.	50
Figura 3.22 - Flange XY do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta com patins do eixo X na parte superior e patins do eixo Y abaixo do flange em perspectiva isométrica.....	51
Figura 3.23 - Estrutura Z do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta. Vista isométrica mostrando o spindle modelo TLO-100-3.7-20 R00 da TECMAF® (2022) embutido e o flange de fixação do spindle na estrutura Z.	52
Figura 3.24 - Estrutura Z do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta. Vista isométrica em corte mostrando o furo central de acesso ao spindle modelo TLO-100-3.7-20 R00 da TECMAF® (2022) e o flange de fixação do spindle na estrutura Z.	52
Figura 3.25 - Estrutura Z do Protótipo 3 da minimáquina-ferramenta com guia, fuso, porca, suporte da porca, motor eletromagnético, mancais, suporte do motor, cavidades de acesso e spindle. Uma guia foi ocultada para mostrar os furos de montagem.....	53
Figura 3.26 - Vista superior em detalhe do acesso externo de montagem dos patins devido a diferença de largura entre as estruturas Z e X.	53

Figura 3.27 - Mancais, fusos de esferas recirculantes, porcas e suportes das porcas dos eixos, guias, abraçadeiras das porcas, suportes dos motores e motores eletromagnéticos dos eixos X, Y e Z em perspectiva isométrica do terceiro protótipo.....	54
Figura 3.28 - Vistas do Protótipo 3 da minimáquina-ferramenta no terceiro diedro. (a) frontal, (b) lateral esquerda, (c) superior e (d) isométrica.	55
Figura 3.29 - Estrutura X com a primeira otimização do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta em vista isométrica, furos adicionados para modificação do CG da estrutura.....	56
Figura 3.30 - Vistas do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta no terceiro diedro. (a) frontal, (b) lateral esquerda, (c) superior e (d) isométrica.	56
Figura 3.31 - Vista isométrica da estrutura X otimizada do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta que contemplou em canal interno central na estrutura ao longo da direção X.....	57
Figura 3.32 - Vistas do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta no terceiro diedro. (a) frontal, (b) lateral esquerda, (c) superior e (d) isométrica.	58
Figura 3.33 - Estrutura X do protótipo 4 da minimáquina-ferramenta com furos de otimização, rebaixos e furos de acesso para montagem.	59
Figura 3.34 - Novo suporte da porca do fuso Z do protótipo 4.	59
Figura 3.35 - Estrutura Z do protótipo 4 em perspectiva isométrica da minimáquina-ferramenta com furos de otimização e spindle da TECMAF® modelo TVS-47-2,2-20 montado externamente.	60
Figura 3.36 - Face posterior da nova estrutura Z do Protótipo 4 em perspectiva isométrica.....	60
Figura 3.37 - Vistas do protótipo 4 da minimáquina-ferramenta no terceiro diedro. (a) frontal, (b) lateral esquerda, (c) superior e (d) isométrica.	61
Figura 3.38 - Estrutura base do protótipo 5 da minimáquina-ferramenta com sistema linear parcial do eixo Y em perspectiva isométrica.	62
Figura 3.39 - Estrutura base do protótipo 5 da minimáquina-ferramenta em vista ampliada para mostrar os detalhes de montagem dos inserts, suportes de mancais, guias, patins, motor eletromagnético, fuso, porca e suporte da porca.	62
Figura 3.40 - Conjunto montado de inserts (parafusos), nivelador da guia e guia.	63

Figura 3.41 - Flange XY do protótipo 5 da minimáquina-ferramenta com patins superiores do eixo X e furos otimizados para montagem dos patins em perspectiva isométrica.	63
Figura 3.42 - Estrutura X do protótipo 5 da minimáquina-ferramenta com patins do eixo Z e furos laterais de otimização de diâmetros menores do que os dos protótipos anteriores em perspectiva isométrica.	64
Figura 3.43 - Estrutura Z do protótipo 5 da minimáquina-ferramenta com furos de otimização, guias, motor eletromagnético, suporte do motor, mancais, fusos, suporte da porca e porca em perspectiva isométrica.....	65
Figura 3.44 - Suporte para spindle Tecmaf® modelo TLO-100-3.7-20 em perspectiva isométrica.....	65
Figura 3.45 - Esboço do protótipo 5 da minimáquina-ferramenta em perspectiva isométrica.....	66
Figura 3.46 - Estrutura base do protótipo 6 da minimáquina-ferramenta com guias de rolos recirculantes, fuso, suporte da porca, porca, espaçadores, mancais, suporte de motor e motor eletromagnético em perspectiva isométrica.....	66
Figura 3.47 - Flange XY do protótipo 6 da minimáquina-ferramenta com patins de rolos recirculantes em perspectiva isométrica.	67
Figura 3.48 - Estrutura X do protótipo 6 da minimáquina-ferramenta com furos de otimização, acessos de montagem, motor eletromagnético, suporte do motor eletromagnético, fuso, porca, abraçadeira da porca, mancais, espaçadores, guias do eixo Y e patins do eixo Z em perspectiva isométrica.....	67
Figura 3.49 - Estrutura Z do protótipo 6 da minimáquina-ferramenta com furos de otimização, acessos de montagem, motor eletromagnético, suporte do motor eletromagnético, fuso, porca, abraçadeira da porca, mancais, espaçadores e guias do eixo Z, em perspectiva isométrica.	68
Figura 3.50 - Esboço do protótipo 6 da minimáquina-ferramenta em vista isométrica.	68
Figura 3.51 - Patim modificado com buchas com furo central descentralizado para alinhamento e montagem dos patins dos eixos X e Y em vista isométrica.	69
Figura 3.52 - Flange XY do protótipo 7 da minimáquina-ferramenta com patins do eixo X na face superior e furo de montagem coincidente, em vista isométrica.	70
Figura 3.53 - Vista lateral esquerda da estrutura base em detalhe com suportes retangulares das guias, espaçador, motor e guias do eixo Y.	70

Figura 3.54 - Estrutura base do protótipo 8 da minimáquina-ferramenta com guias, insertos, mancais, fuso, suporte da porca, porca, espaçadores, suporte do motor e motor eletromagnético, em vista isométrica.....	71
Figura 3.55 - Vista em perspectiva isométrica do suporte da porca do fuso de esferas recirculantes do eixo Y.....	71
Figura 3.56 - Flange XY do protótipo 8 da minimáquina-ferramenta com patins do eixo X na face superior e furos de montagem dos suportes das porcas dos fusos Y e fuso X em perspectiva isométrica.	72
Figura 3.57 - Suporte da porca do fuso X vista em perspectiva isométrica.....	72
Figura 3.58 - Vista isométrica do projeto 8 da minimáquina-ferramenta. (a) estrutura X com otimização do CG e acessos de montagem dos patins por meio de furos passantes e (b) estrutura X com otimização do CG por meio de furos e acessos de montagem por meio de canais laterais.	73
Figura 3.59 - Estrutura Z do protótipo 8 da minimáquina-ferramenta com furos de acesso de montagem dos patins e otimização do CG, em perspectiva.....	73
Figura 3.60 - Esboço do protótipo 8 da minimáquina-ferramenta em perspectiva isométrica.....	74
Figura 3.61 - Estrutura X do protótipo 9 da minimáquina-ferramenta com furos de montagem dos patins e abraçadeira da porca do fuso X sem furos de otimização do CG em perspectiva isométrica.	75
Figura 3.62 - Estrutura Z do protótipo 9 da minimáquina-ferramenta com furos de otimização do CG e acesso de montagem dos patins do eixo Z em perspectiva isométrica.....	75
Figura 3.63 - Acessos unificados aos suportes das porcas, mancais e acoplamento elástico dos eixos X e Z, (a) vista frontal e (b) vista superior.	76
Figura 3.64 - Estrutura base do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta com guias, insertos, mancais, fuso, suporte da porca, porca, espaçadores, suporte do motor, motor eletromagnético e acessos criados com insertos de tubos de PVC em vista isométrica.....	77
Figura 3.65 - Protótipo 10 da minimáquina-ferramenta em perspectiva isométrica...77	
Figura 3.66 - Menu de seleção do tipo de estudo a ser realizado no Fusion 360®....78	
Figura 3.67 - Botão simplificar a esquerda da paleta de seleção de ferramentas do Fusion 360®.	79

Figura 3.68 - Simplificação do modelo do décimo protótipo com a remoção de elementos desnecessários a análise estrutural estática da minimáquina-ferramenta.....	79
Figura 3.69 - (a) Ferramenta de análise de interferência e (b) resultado da análise no Fusion 360®.	80
Figura 3.70 - Seleção de materiais da minimáquina-ferramenta no Fusion 360®.....	80
Figura 3.71 - Ferramenta de gerenciamento de propriedades de materiais do Fusion 360®.....	81
Figura 3.72 - Propriedades do GS adicionados a biblioteca do Fusion 360®.....	81
Figura 3.73 - Propriedades do Aço AISI E51100 adicionadas ao Fusion 360®.....	82
Figura 3.74 - Ferramenta para seleção de restrições estruturais do Fusion 360®.....	82
Figura 3.75 - (a) Protótipo 10 em vista isométrica com os apoios engastados representados esquematicamente em vista isométrica. (b) Protótipo 10 sobre uma mesa de Aço AISI 1045 de dimensões de 2 000 mm x 1 840 mm x 50 mm com contato rugoso em vista isométrica.....	83
Figura 3.76 - Ferramenta para adição de carregamento no Fusion 360®.	84
Figura 3.77 - Recurso para gerar contato automaticamente do Fusion 360®.....	84
Figura 3.78 - Tabela de gerenciamento de contatos do Fusion 360®.....	85
Figura 3.79 - Ferramenta de edição das propriedades da geração de malha do Fusion 360®.....	85
Figura 3.80 - Configuração final da malha no ambiente de simulação do Fusion 360®.	86
Figura 3.81 - Recurso de verificação das condições de contorno (botão da esquerda) e de execução da simulação (segundo botão da direita) do Fusion 360®.	87
Figura 3.82 - Posições críticas da estrutura da minimáquina-ferramenta consideradas para simulação. (a) estrutura X retraída e (b) estendida.....	88
Figura 3.83 - (a) considera força de usinagem de 100 N no sentido positivo do eixo Y sem atuação da gravidade. (b) somente atuação da gravidade na estrutura. (c) combinação da condição (a) com atuação da gravidade. (d) força de 100 N com direção e sentido negativo do eixo Z com atuação da gravidade. (e) força de 50 N no sentido positivo do eixo Y, 70,711 N no sentido positivo do eixo X e 50 N no sentido negativo do eixo Z com ação da gravidade.	89
Figura 3.84 - Posições críticas da estrutura da minimáquina-ferramenta consideradas para simulação. (a) Estrutura X retraída e (b) estendida.	89

- Figura 3.85 - (a) considera força de usinagem de 100 N no sentido positivo do eixo Y sem atuação da gravidade. (b) somente atuação da gravidade na estrutura. (c) combinação da condição (a) com atuação da gravidade. (d) força de 100 N com direção e sentido negativo do eixo Z com atuação da gravidade. (e) força de 50 N no sentido positivo do eixo Y, 70,711 N no sentido positivo do eixo X e 50 N no sentido negativo do eixo Z com atuação da gravidade.90
- Figura 4.1 - Vista em perspectiva isométrica da malha de elementos finitos tetraédricos (3 921 092 nós e 2 607 055 elementos) na condição de engastamento 1 e posição 2 da minimáquina-ferramenta.....91
- Figura 4.2 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y com resultados das tensões máxima e mínima.....92
- Figura 4.3 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y com resultados das deformações máxima e mínima.....93
- Figura 4.4 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y com resultados das reações de apoio.....93
- Figura 4.5 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y com resultados do fator de segurança.....94
- Figura 4.6 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a ação da gravidade com resultados das tensões máxima e mínima.....95
- Figura 4.7 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a ação da gravidade com resultados das deformações máxima e mínima.....96
- Figura 4.8 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a ação da gravidade com resultados das reações de apoio.....96
- Figura 4.9 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de

força na direção positiva do eixo Y e sob a ação da gravidade com resultados das tensões máxima e mínima.	97
Figura 4.10 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y e sob ação da gravidade com resultados das deformações máxima e mínima.	98
Figura 4.11 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y e sob ação da gravidade com resultados das reações de apoio.	98
Figura 4.12 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção negativa do eixo Z e sob ação da gravidade com resultados das tensões máxima e mínima.	99
Figura 4.13 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção negativa do eixo Z e sob ação da gravidade com resultados das deformações máxima e mínima.	100
Figura 4.14 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção negativa do eixo Z e sob ação da gravidade com resultados das reações de apoio.	100
Figura 4.15 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força decomposta nos eixos X, Y e - Z, sob ação da gravidade com resultados das tensões máxima e mínima.	101
Figura 4.16 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força decomposta nos eixos X, Y e - Z, sob ação da gravidade com resultados das deformações máxima e mínima.	102
Figura 4.17 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força decomposta nos eixos X, Y e - Z, sob ação da gravidade com resultados das reações de apoio.	102

- Figura 4.18 - Vista em perspectiva isométrica da malha de elementos finitos tetraédricos (3 995 329 nós e 2 653 015 elementos) na condição de engastamento 2 e posição 2 da minimáquina-ferramenta. 103
- Figura 4.19 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y com resultados das tensões máxima e mínima. 104
- Figura 4.20 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y com resultados das deformações máxima e mínima. 104
- Figura 4.21 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y com resultados das reações de apoio. 105
- Figura 4.22 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y com resultados do fator de segurança. ... 106
- Figura 4.23 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a ação da gravidade com resultados das tensões máxima e mínima. 107
- Figura 4.24 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a ação da gravidade com resultados das deformações máxima e mínima. 107
- Figura 4.25 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a ação da gravidade com resultados das reações de apoio. 108
- Figura 4.26 - Vista em perspectiva isométrica do décimo protótipo da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y e sob ação da gravidade com resultados das tensões máxima e mínima. 109
- Figura 4.27 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y e sob ação da gravidade com resultados das deformações máxima e mínima. 109

Figura 4.28 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y e sob ação da gravidade com resultados das reações de apoio.	110
Figura 4.29 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção negativa do eixo Z e sob ação da gravidade com resultados das tensões máxima e mínima.	111
Figura 4.30 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção negativa do eixo Z e sob ação da gravidade com resultados das deformações máxima e mínima.	111
Figura 4.31 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção negativa do eixo Z e sob ação da gravidade com resultados das reações de apoio.	112
Figura 4.32 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força decomposta nos eixos X, Y e -Z, sob ação da gravidade com resultados das tensões máxima e mínima.	113
Figura 4.33 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força decomposta nos eixos X, Y e -Z, sob ação da gravidade com resultados das deformações máxima e mínima.	113
Figura 4.34 - Vista em perspectiva isométrica do Protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força decomposta nos eixos X, Y e -Z, sob ação da gravidade com resultados das reações de apoio.	114
Figura 4.35 - Vista em perspectiva isométrica da (a) estrutura Z e (b) estrutura X.	122
Figura 4.36 - Vista em perspectiva isométrica da minimáquina-ferramenta em (a) condição de engastamento 1 e posição 1 e (b) condição de engastamento 2 e posição 1.	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades típicas de concreto polimérico e ferro fundido.....	12
Tabela 3.1 - Valores típicos de rigidez estrutural de máquinas-ferramenta.	32
Tabela 3.2 - Propriedades do GS.....	32
Tabela 3.3 - Força resultante para simulação das condições críticas de projeto devido à força de usinagem.	36
Tabela 3.4 - Quadro morfológico da minimáquina-ferramenta multifuncional CNC...37	
Tabela 3.5 - Componentes iniciais de suporte de motores e fusos de esferas recirculantes.....	40
Tabela 3.6 - Relação de guias e patins considerados nos dez protótipos.....	42
Tabela 3.7 - Distâncias em milímetros entre os CG das estruturas X e Z para as linhas de ação dos fusos.....	55
Tabela 3.8 - Planejamento experimental da análise estática da estrutura da minimáquina-ferramenta.	87
Tabela 4.1 - Resultados gerais das simulações computacionais em função das condições de contorno.....	122

SIGLAS E ABREVIACÕES

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
SP	<i>Spindle</i> ou cabeçote
Cp	Calor específico
E	Módulo de elasticidade
f ^o	Ferro Fundido
GS	Granito Sintético
k	Coefficiente de transmissão de calor
K	Condutividade térmica
PCM	Ponto Crítico da Máquina
UUP	Usinagem de Ultraprecisão
ν	Coefficiente de Poisson
σ_c	Resistência à compressão
σ_f	Resistência à flexão
σ_t	Resistência à tração
σ_0	Resistência ao cisalhamento
ρ	Densidade
α_0	Coefficiente de dilatação térmica
C	Capacidade térmica
ξ	Coefficiente de amortecimento
EP	Estrutura Portal
EC	Estrutura em C
LEPU	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica

UFU	Universidade Federal de Uberlândia
ZTA	Zona Termicamente Afetada
EPS	Estrutura Portal Simétrica
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>NEMA</i>	<i>National Electrical Manufacture Assossiation</i>
<i>CAE</i>	<i>Computer Aided Engineering</i>
<i>CAM</i>	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CG	Centro de Gravidade
<i>PVC</i>	<i>Polyvinyl Chloride</i>
<i>AISI</i>	<i>American Iron and Steel Institute</i>
CNC	Controle Numérico Computadorizado

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	GEOMETRIA DE ESTRUTURA DE MÁQUINA-FERRAMENTA.....	3
2.2	MATERIAL DE CONSTRUÇÃO DE MÁQUINA-FERRAMENTA.....	8
2.2.1	GRANITO SINTÉTICO E CONCRETO POLIMÉRICO	9
2.2.2	PROPIEDADES DOS CONCRETOS POLIMÉRICOS	12
2.3	ASPECTOS DE PROJETO DE MOLDE E FABRICAÇÃO DE GRANITO SINTÉTICO	14
2.3.1	MOLDES PERMANENTES E TEMPORÁRIOS.....	17
2.3.2	PROJETO DE MOLDE	17
2.4	SISTEMAS LINEARES.....	18
2.4.1	GUIAS DE ELEMENTOS ROLANTES	20
2.4.2	FUSO DE ELEMENTOS RECIRCULANTES	24
3	MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1	IDENTIFICAÇÃO DA DEMANDA.....	29
3.2	PROJETO CONCEITUAL	30
3.2.1	DELIMITAÇÃO DO PROJETO	30
3.2.2	QUADRO MORFOLÓGICO.....	37
3.2.3	CONCEITO ESTRUTURAL.....	38
3.2.4	ESPECIFICAÇÕES	39
3.2.4.1	MOTORES ELETROMAGNÉTICO	39
3.2.4.2	FUSOS DE ESFERAS RECIRCULANTES	40
3.2.4.3	GUIAS LINEARES E PATINS DE ELEMENTOS RECIRCULANTES	41

3.3	PROJETO PRELIMINAR.....	42
3.3.1	PROTÓTIPO 1	42
3.3.2	PROTÓTIPO 2	43
3.3.3	PROTÓTIPO 3	48
3.3.4	PROTÓTIPO 4	58
3.3.5	PROTÓTIPO 5	62
3.3.6	PROTÓTIPO 6	66
3.3.7	PROTÓTIPO 7	69
3.3.8	PROTÓTIPO 8	70
3.3.9	PROTÓTIPO 9	74
3.3.10	PROTÓTIPO 10	76
3.4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	78
3.4.1	CONFIGURAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO.....	78
3.4.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	87
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	91
4.1	ENGASTAMENTO 1	91
4.1.1	CASO 1	92
4.1.2	CASO 2	94
4.1.3	CASO 3	97
4.1.4	CASO 4	99
4.1.5	CASO 5	101
4.2	ENGASTAMENTO 2	103
4.2.1	CASO 1	103
4.2.2	CASO 2	106
4.2.3	CASO 3	108
4.2.4	CASO 4	110
4.2.5	CASO 5	112

4.3	DISCUSSÕES	115
4.3.1	Requisitos de projeto	115
4.3.2	Fusion 360®	117
4.3.3	Protótipos 1 a 9	118
4.3.4	Protótipo 10	120
4.3.5	Granito sintético.....	124
4.3.6	Elementos de máquina	125
4.3.7	Considerações finais	125
5	CONCLUSÃO	127
6	PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS.....	129
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
	APÊNDICE A – Mosaico contendo os 10 protótipos.....	137
	APÊNDICE B – Desenhos 2D do Protótipo 10.....	138
	APÊNDICE C – Lista de materiais.....	143

1 INTRODUÇÃO

A busca por equipamentos eletrônicos cada vez menores e de qualidade óptica excelente criou necessidade por tolerâncias de projeto cada vez mais estreitas e de melhor acabamento superficial. A Usinagem de Ultraprecisão (UUP) supre essa demanda por ser uma técnica que permite produzir componentes ópticos, mecânicos e eletrônicos (Figura 1.1) com exatidão dimensional na faixa submicrométrica a nanométrica, rugosidade superficial nanométrica e controle da integridade superficial e subsuperficial visando não introduzir danos críticos ao material usinado.

Figura 1.1 - Disco Rígido de computador possui componentes que são fabricados com usinagem de ultraprecisão.



(TECHTUDO, 2022)

A demanda urgente e crescente por processos cada vez mais precisos, produtivos e de fácil acesso em solo nacional gera um crescimento no interesse de pesquisa na área. A UUP tem a tendência de se tornar uma das áreas de maior interesse e discussão conforme a evolução nos setores de projeto e produção de soluções viáveis para uso em pesquisa, manufatura e melhora da qualidade de vida.

Com a necessidade de exatidão dimensional e geométrica nos processos de UUP surgem soluções de projetos que visam atender tais requisitos. Uma máquina de UUP necessita ser rígida, ter amortecimento mecânico, atrito reduzido em suas partes móveis e estabilidade química, térmica e, conseqüentemente, dimensional.

A rigidez de uma máquina-ferramenta está diretamente ligada à sua estrutura (material e geometria). O trabalho de Rodrigues (2022), que pertence ao grupo de pesquisa do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) concluiu que,

independentemente da geometria estrutural avaliada naquela pesquisa, foi possível obter a rigidez estática exigida em projeto.

Segundo Rodrigues (2022), apesar dos aspectos de rigidez, amortecimento e material da estrutura da máquina-ferramenta, não é qualquer geometria estrutural que se torna viável técnica e economicamente. Rodrigues (2022) demonstrou que as estruturas do tipo portal (EP) e tipo C (EC) equilibram facilidade de fabricação e desempenho, justificando técnica e cientificamente porque são as estruturas mais utilizadas por fabricantes de máquinas-ferramentas convencionais e de ultraprecisão.

O material que irá compor a estrutura da máquina-ferramenta também influencia a fabricação e o desempenho requeridos pela delimitação do projeto. O estado da técnica embasado por revisão bibliográfica e experiência do grupo de pesquisa do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), assim como seus parceiros, sobre materiais de máquinas-ferramentas de precisão e ultraprecisão apontaram o granito sintético (GS) como material de engenharia adequado para esse fim, por conciliar, economicamente, os desafios de manufatura (modelamento, molde, moldagem, desmoldagem, pós-processamento), montagem e desempenho.

O GS por apresentar densidade relativa menor que a dos ferros fundidos (f^{fo}) e dos aços, ter maior amortecimento que ambos, apresentar rigidez e estabilidade, custo de fabricação reduzido com menor impacto ambiental por não exigir temperaturas na faixa de fusão das ligas metálicas tipicamente aplicadas em estruturas, é um dos materiais mais empregados em estruturas de máquinas-ferramentas e equipamentos metrológicos de precisão e ultraprecisão. O projeto da estrutura de GS tem particularidades que o difere do projeto de estruturas metálicas fundidas, principalmente pela moldagem a temperatura ambiente, moldes geometricamente mais complexos, aplicação e referenciamento de insertos e superfícies funcionais que devem ser consideradas ao longo de todas as fases de projeto da estrutura.

A dependência nacional de tecnologias, produtos e serviços estrangeiros aliada a demanda mundial por equipamentos multifuncionais e híbridos voltados a manufatura aditiva e subtrativa avançada, assim como a demanda por equipamentos e células de manufatura miniaturizados, criam a oportunidade para projetos acadêmicos e industriais para suprir essa demanda. Esses produtos e serviços de alta tecnologia inovadores potencializam o desenvolvimento econômico e social nacional.

1.1 OBJETIVO

A partir da identificação da demanda, este trabalho tem o objetivo de avançar com o desenvolvimento científico e tecnológico na área de projeto de minimáquinas-ferramentas de precisão realizado no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC-UFU) visando uma plataforma CNC original concebida para desempenhar múltiplos processos subtrativos e aditivos, conferindo multifuncionalidade e realização de processos híbridos de manufatura com estrutura de GS otimizada com rigidez de $100 \text{ N}/\mu\text{m}$, amortecimento estrutural passivo, estabilidade dimensional e geométrica, redução dos custos de fabricação, montagem e manutenção.

A pesquisa possui financiamento da FAPEMIG por meio do Projeto de Pesquisa APQ-01759-17 e dá continuidade ao Projeto de Fim de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica iniciado por Rodrigues (2022).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os seguintes temas: geometria de estrutura de máquina-ferramenta, material de construção de máquina-ferramenta, aspectos de projeto de molde e fabricação de GS e sistemas lineares.

O Capítulo 2.1, geometria de estrutura de máquina-ferramenta, retrata a geometria de estrutura de máquina-ferramenta, mostra o contexto do projeto da estrutura de máquinas-ferramentas, suas formas e aspectos de aplicação na usinagem de precisão.

O Capítulo 2.2, material de construção de máquina-ferramenta, apresenta-se os materiais tradicionalmente aplicados e suas características. O GS é apresentado como uma solução de material construtivo, suas propriedades mecânicas e os motivos que o tornam interessantes para aplicação em estruturas de máquinas de precisão.

O Capítulo 2.3, aspectos de projeto de molde e fabricação, é abordado a fabricação de uma estrutura de GS. O projeto, construção e uso de moldes também são apresentados.

O Capítulo 2.1, por sua vez, sistemas lineares, apresenta os elementos de máquinas responsáveis pelos movimentos com precisão, repetibilidade e exatidão de posicionamento nas máquinas-ferramentas e seus aspectos construtivos.

2.1 GEOMETRIA DE ESTRUTURA DE MÁQUINA-FERRAMENTA

Smith e Chetwynd (1994) observaram que após quase dois séculos da primeira revolução industrial, a fabricação de componentes de precisão tornou-se algo comum e frequente, onde, precisão é definido como a relação entre dimensão e tolerância.

De acordo com Weingaertner e Stoeterau (1999) a popularização de equipamentos e produtos de alta tecnologia como, por exemplo, componentes periféricos de microcomputadores e lentes, aconteceram graças a emancipação das pesquisas na área de UUP.

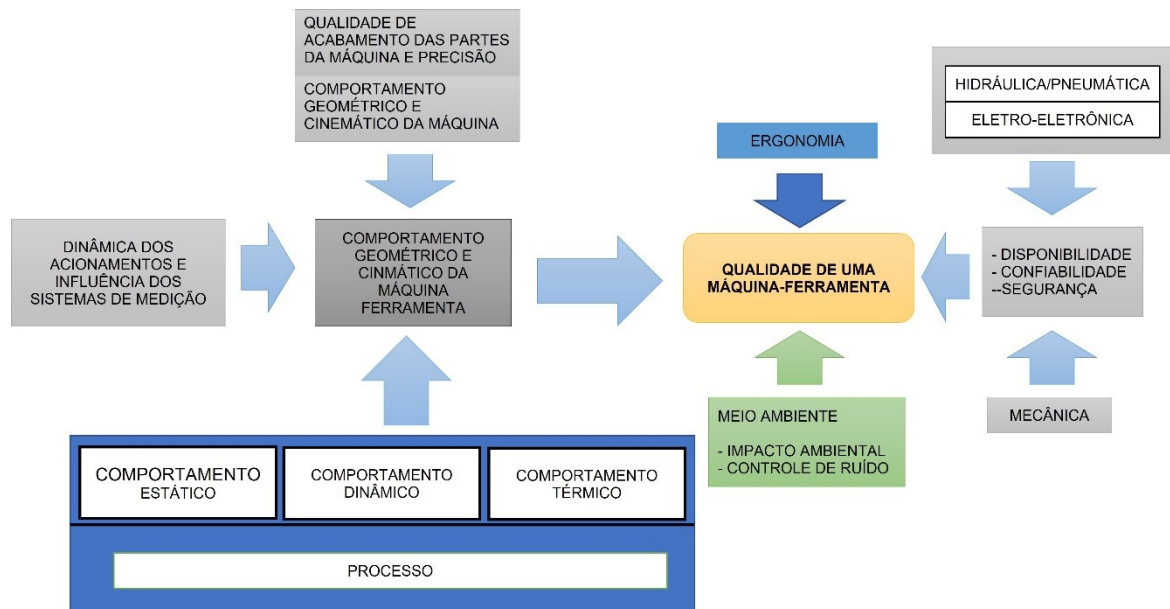
Como observado por DUDUCH¹ (1993 apud RUBIO, 2000; KIM e KIM, 1996), a emancipação aliada a alta demanda industrial em produtos de formas complexas e tolerâncias estreitas provocou uma necessidade cada vez maior por métodos e/ou processos de fabricação aptos a produzirem superfícies funcionais de alta qualidade.

¹ DUDUCH, J. G. Some critical aspects of machine design and performance for the machining of brittle material. Institute of Technology, Cranfield, England. 1993.

Tais produtos podem ser obtidos por meio da usinagem direta, no caso de uma pré-forma que é subtrativamente processada em um produto ou parte dele, ou de forma indireta, que são os casos de matrizes para conformação ou injeção (STOETERAU, 2004).

Porém, usinar componentes com exatidão dimensional e qualidade superficial como exigido tem como ponto central as máquinas-ferramentas de ultraprecisão (STOETERAU, 2004). Na Figura 2.1 são demonstradas as relações que interferem diretamente na qualidade da máquina-ferramenta.

Figura 2.1 - Fluxograma de relações que interferem na qualidade da máquina-ferramenta.



(Adaptado de WECK¹, 1992 *apud* STOETERAU, 2004).

Conforme a Figura 2.1, as máquinas têm sua qualidade diretamente associada aos elementos que a compõem, uso a que são destinadas, esforços ao qual serão submetidas (seja térmico ou mecânico), assim como as precisões e acabamentos estipulados para a peça (WECK², 1992 *apud* STOETERAU, 2004).

A estrutura da máquina-ferramenta é responsável por fornecer todas as superfícies de montagem requeridas para se tornar funcional (STOETERAU, 2004). Assim sendo, ela precisa atender requisitos de deformações mínimas quando submetida a ações de elementos externos ou ações de carregamento, fazendo com que ela tenha a função principal de oferecer rigidez estática e dinâmica (STOETERAU, 1995).

¹ WECK, M. *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme*, vol. 3. VDI-Verlag. 1992.

² Cf. WECK, 1992.

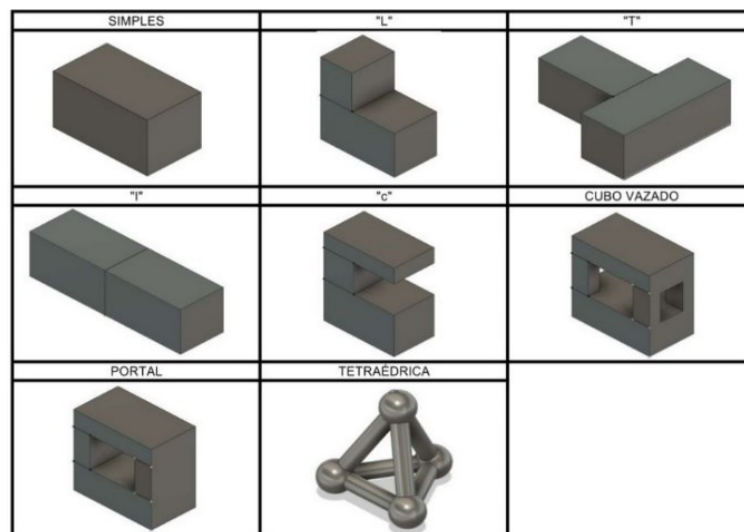
Segundo Stoeterau (2004), os elementos que integram a máquina-ferramenta são atualmente fornecidos por terceiros. São exemplos as guias, acionamentos, sistemas de medição e controle, dispositivos de segurança, sistemas hidráulicos e pneumáticos, fiações elétricas, tubulações, sistemas de coleta e remoção de cavacos e fluidos. Os componentes estruturais devem atender a alguns requisitos, são eles:

- Rigidez estática;
- Rigidez dinâmica;
- Estabilidade térmica;
- Estabilidade química;
- Facilidade de manipulação;
- Acessibilidade aos componentes internos; e
- Custo.

É interessante notar que apesar dessas várias variáveis, tanto de tipos de elementos quanto de materiais que constituirão a máquina-ferramenta, elas não influenciarão no arranjo da estrutura. O arranjo na verdade é fortemente dependente da cinemática do processo, opção construtiva da máquina e limites do processo de fabricação compatível com o material a ser empregado (STOETERAU, 1999).

Os arranjos construtivos mais comuns encontrados no projeto de máquinas-ferramentas de ultraprecisão são apresentados na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Arranjos construtivos de máquinas-ferramentas.



(Adaptado de STOETERAU, 1999).

Tais arranjos estruturais estão presentes nos mais diversos tipos de máquinas-ferramentas independentemente de serem comerciais ou não (STOETERAU, 1999). Como observado por Huo e Cheng (2008) em projetos de precisão, a escolha por arranjos que forneçam rigidez mecânica otimizada e menor influência na variação da temperatura da estrutura estão nas estruturas com malha fechada e laço estrutural apresentando características simétricas.

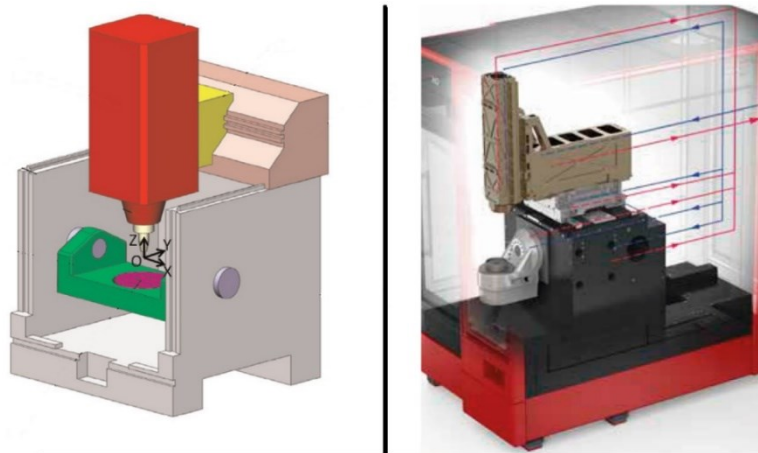
Nota-se que o tamanho da máquina não está diretamente ligado ao seu arranjo estrutural. Por exemplo, as fabricantes HERMLE® (2022) e KERN® (2022) possuem centros de usinagem com mesmo arranjo estrutural, porém dimensões distintas.

O centro de usinagem CNC de cinco eixos C650 da fabricante HERMLE® possui uma faixa nominal de trabalho de 1 050 mm x 900 mm x 600 mm, trabalha com peças de massa até 3 toneladas e a máquina tem massa de 15 toneladas (HERMLE®, 2022). Esta é uma máquina-ferramenta de precisão com proporções relativamente grandes, principalmente quando comparada ao centro de usinagem de ultraprecisão Kern Micro HD (KERN®, 2022).

O modelo Kern Micro HD da fabricante KERN® é um centro de usinagem CNC de 5 eixos de ultraprecisão com massa de 5,5 toneladas. Sua faixa nominal de trabalho é de 350 mm x 220 mm x 250 mm e aceita peças de até 50 kg (KERN, 2022).

Ambos os arranjos estruturais são semelhantes, apesar de serem máquinas distintas em tamanho, capacidade de remoção e resultados, sendo similares quanto aos cinco graus de liberdade, cinemática e a construção do tipo portal simétrico, como exemplificado na Figura 2.3.

Figura 2.3 - A esquerda arranjo estrutural da HERMLE C650 e à direita da KERN MICRO HD.



(HERMLE; KERN, 2022).

2.2 MATERIAL DE CONSTRUÇÃO DE MÁQUINA-FERRAMENTA

Projetar uma máquina por completo implica na seleção de material. O melhor material, no entanto, é definido como aquele mais propício a aplicação e que poderá resistir as condições e ambiente de operação. Sabe-se que usualmente partes de máquinas são feitas de f^{of} , com conhecido desempenho de amortecimento superior aos aços. O amortecimento é um dos fatores que determinam as propriedades dinâmicas de uma máquina-ferramenta e tem grande impacto sobre as capacidades de usinagem, tornando-se um dos fatores mais importantes. Sabe-se que o GS possui um fator de amortecimento de quatro a sete vezes superior ao f^{of} e três vezes maior que o do granito natural. Assim, o GS tem sido usado como alternativa ao f^{of} na fabricação de estruturas de máquinas (MCKEOWN e MORGAN, 1979; BRUNI *et al.*, 2005; CORTÉS e CASTILLO, 2006; ATES e GERGER, 2013).

O f^{of} se destaca quanto o seu uso em altos volumes de produção, boa conformabilidade, custo relativo ao aço menor em estruturas de grande volume, bom absorvedor de vibrações frente ao aço soldado e fundido (MÖHRING *et al.*, 2015; FORTURLAN *et al.*, 2021). O f^{of} tem como desvantagem maior densidade relativa (comparado ao GS), necessidade de moldes de fundição, ângulos de saída nos moldes, menor resistência mecânica (f^{of} cinzento) relativa aos aços estruturais, baixa soldabilidade, baixa usinabilidade (f^{of} nodular) e menor resistência à fadiga (FORTURLAN *et al.*, 2021).

Alguns aços destacam-se como material de construção devido a resistência mecânica, usinabilidade, disponibilidade e soldabilidade. Por não precisar de moldes caros e muito menos núcleos de fundição possuem vantagens econômicas nesse caso frente ao fofo (CHIAVERINI, 2015; MÖHRING, 2015; FURLAN, 2021).

Fortulan *et al.* (2021) destacam as desvantagens das estruturas soldadas de aço como necessidade de mão de obra qualificada, dificuldade de acesso para soldagem, distorções geométrica e dimensional, sensitização do material e ocorrência de Zona Termicamente Afetada (ZTA).

Lintz (2003) destaca que desde a década de 70 pesquisadores buscam materiais alternativos que sirvam para o uso construtivo de máquinas-ferramentas, porém que solucionem os problemas causados pelas desvantagens dos materiais tradicionais. Alguns desses materiais propostos foram o concreto de cimento hidráulico, concreto polimérico, aço doce soldado e, principalmente o GS e o granito natural.

Koblischek¹ (1978 apud LINTZ, 2003) fabricou bases de máquinas-ferramenta de concreto polimérico denominado de Motema-AC que, segundo o autor, possui comportamento dinâmico superior ao ferro fundido com amortecimento de vibração seis vezes maior e melhor estabilidade térmica.

Mckewon e Morgan (1979), desenvolveram concreto polimérico à base de granito, denominado Granitan S-100, que evoluiu a partir da adição de agregados de quartzo e aditivos químicos fazendo-o ter uma maior resistência mecânica e durabilidade.

Kreienbühl em 1988, como mostrou KREIENBUHL² (1991 apud LINTZ, 2003), construiu uma base de máquina-ferramenta a partir de concreto a base de resina epóxi e observou uma economia de 30 % no custo do material, capacidade de amortecimento oito a dez vezes maior, melhora na qualidade das superfícies usinadas e aumento de vida da máquina-ferramenta de 30 %.

Stoeterau (2004) relata a tradição de estruturas feitas a base de granito natural e/ou GS em máquinas de fabricação de precisão e ultraprecisão de maneira geral, como no caso das destinadas as indústrias óptica e eletrônica.

2.2.1 GRANITO SINTÉTICO E CONCRETO POLIMÉRICO

Segundo Lintz (2003) existem três grandes categorias que classificam os concretos que possuem polímero:

- Concreto modificado com látex ou concreto de cimento Portland polimérico ou concreto de cimento Portland modificado por polímero;
- Concreto impregnado com polímero; e
- Concreto polimérico.

O concreto polimérico ou GS é obtido por meio da polimerização de uma mistura de monômeros e agregados. Esse tipo de material não possui fases de cimento Portland hidratado, porém pode ter o cimento Portland usado como agregado ou enchimento (LINTZ, 2003).

¹ KOBLSICHEK, P. J. Acryl-Concrete. Proc. Second International Congress on Polymers in Concrete, 1978, pp. 413-430.

² KREIENBÜHL, R. International Congress on Polymers in Concrete, North American Workshop, San Francisco, September. 1991.

Lintz (2003) afirma que os agregados devem ser secos, menos de 0,2 % de umidade, e livres de sujeiras e materiais orgânicos. Para reduzir a quantidade de resina recomenda-se agregados lisos para que assim a mistura forneça uma maior trabalhabilidade. Os agregados mais utilizados são:

- Areia silicosa;
- Granito;
- Cascalho de rio;
- Basalto;
- Cinzas volante;
- Carbonato de cálcio; e
- Pó de sílica.

Os monômeros mais utilizados são:

- Metacrilatos;
- Epóxi;
- Furfuro;
- Estireno;
- Trimetilpropano de trimetacrilato;
- Poliéster insaturado; e
- Éster de vinila.

Renker (1985) destaca que as resinas aplicadas aos granitos sintéticos possuem suas próprias características que influenciarão na forma final, bem como nas propriedades mecânicas da estrutura da máquina:

- A resina a base de poliéster é a mais barata dos termofixos que se curam a temperatura ambiente, porém devido ao seu comportamento de cura exotérmica e retração faz com que grandes tensões internas se formem na estrutura. Ele acaba por não ser recomendado no uso de material estrutural em máquinas-ferramentas.

- Resina metacrilato é mais cara que a base de poliéster, mas é mais barata que a resina epóxi. Também de cura fortemente exotérmica pode introduzir tensões internas que produzem deformações no componente fundido. Tem sido usada como resina estrutural em protótipos de máquinas-ferramentas, não recomendada para produção em massa e produtos de vida longa.
- A resina epóxi pode ser curada a temperatura ambiente e apresenta viscosidades adequadas, logo ideal para produzir componentes de máquinas-ferramentas sem tensões internas residuais e trincas, sendo a mais aplicada a estruturas de GS devido as elevadas propriedades mecânicas e resistência química.

De acordo com McKeown e Morgan (1979) o GS com epóxi não possui as desvantagens dos materiais convencionais como o concreto, granito natural, ferro e aço, possuindo a maior parte das vantagens desses materiais e, em muitos casos, propriedades significativamente melhores. O GS possui menor densidade, maior absorção de vibração, melhor inércia química, melhor estabilidade dimensional, fundição em moldes temporários e permanentes a temperatura praticamente ambiente (menor reação exotérmica de cura).

Algumas empresas já empregam o GS em estruturas, como é o caso da empresa Studer que na sua máquina-ferramenta S11, apresentada na Figura 2.4, possui estrutura de Granitan® S103. Diversos outros modelos de máquinas são oferecidos em GS pela renomada empresa Studer.

Figura 2.4 - Base da máquina-ferramenta Studer™ S11 construída de Granitan® S103.



(STUDER, 2022).

Na Figura 2.5 é apresentada a estrutura de GS chamado de KERN-Armorith ou *mineral cast* (livremente traduzido como fundição mineral) patenteado pela fabricante Kern, aplicado a estrutura do centro de usinagem Kern Micro HD (KERN, 2020).

Figura 2.5 - Estrutura construída de material patenteado chamado de KERN-Armorith (compósito de minério, reforçado com pesadas estruturas de metal), feita pela fabricante Kern.



(KERN, 2022).

2.2.2 PROPIEDADES DOS CONCRETOS POLIMÉRICOS

Na Tabela 2.1, Ates e Gerger (2013) compararam as propriedades dos diferentes tipos de concretos poliméricos e f^os.

Tabela 2.1 - Propriedades típicas de concreto polimérico e ferro fundido.

Propriedades	Concreto polimérico	Ferro fundido
Módulo de Elasticidade (kN/mm ²)	30 – 40	80 – 100
Coefficiente de Poisson	0,20	0,30
Resistência à Compressão (N/mm ²)	100 – 160	700 – 1 200
Resistência ao Cisalhamento (N/mm ²)	25 – 35	300 – 600
Resistência à Tração (N/mm ²)	12 – 18	150 – 400
Coefficiente de Amortecimento	6 – 8	1
Coefficiente de Expansão Térmica (m/mK)	17x10 ⁻⁶	11x10 ⁻⁶
Capacidade Térmica (kJ/m ² K)	6,80	210

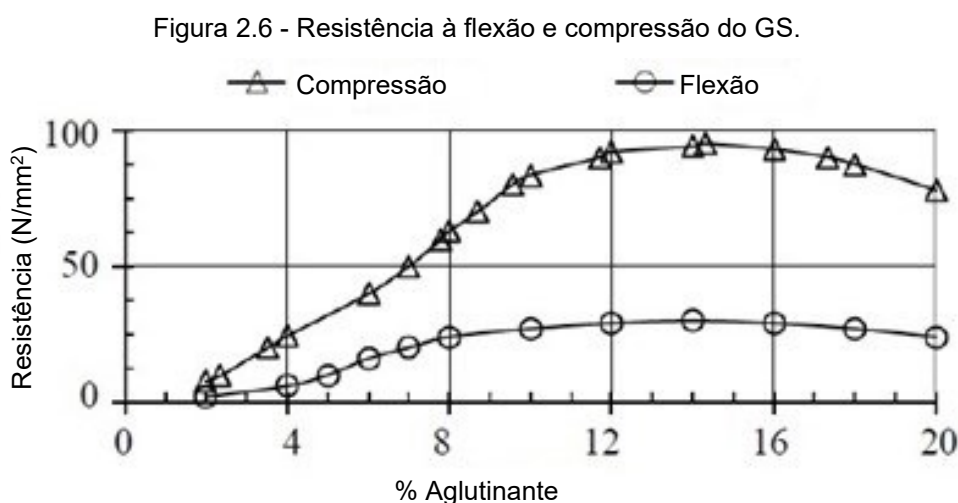
(Tradução da tabela de ATES; GERGER, 2013).

O GS pode ser formado com diferentes receitas que promovem variedade de propriedades. Propriedades importantes são resistência à compressão, flexão e tração, limite de escoamento e fator de amortecimento. Tais propriedades dependem do tipo de resina, material de enchimento e sua quantidade, bem como também temperatura, tempo de cura e porcentagem e distribuição de vazios estruturais.

A seguir são listados alguns parâmetros que modificam as propriedades do GS (LINTZ, 2003; ATES; GERGER, 2013):

- Escolha do aglutinante: mesmo com a desvantagem do custo, resina epóxi fornece a melhor resistência estrutural em GS.
- Material de enchimento: caso se use resina epóxi, quartzo (SiO_2) é recomendado como material de enchimento. Quartzo é um material extremamente duro, massa específica de $2,5 \text{ g/cm}^3$ a $2,9 \text{ g/cm}^3$ e é termicamente estável até $1\ 610 \text{ }^\circ\text{C}$ (ASHBY; JONES, 1986).
- Tamanho e distribuição do agregado: partículas de tamanho entre 2 mm e 16 mm são usadas para diferentes aplicações em GS. Esses agregados são classificados de acordo com seus limites de tamanho máximo e mínimo e são selecionados por meio do método de determinação da composição granulométrica. O objetivo é aumentar o empacotamento para diminuir os espaços vazios; e
- Quantidade de agregados e resina: em granito epóxi é comum que o material do agregado seja quartzo e usa-se em torno de 12 % a 17 % de resina com seu catalisador, obtém-se assim um compósito com alta resistência à compressão e flexão.

Observa-se na Figura 2.6 a relação entre porcentagem de resina e resistência estrutural.



(ATES; GERGER, 2013).

2.3 ASPECTOS DE PROJETO DE MOLDE E FABRICAÇÃO DE GRANITO SINTÉTICO

Apesar de similaridades com os processos de fabricação de peças injetadas ou moldadas, a fabricação do GS possui particularidades que se distinguem desses métodos. As técnicas de processamento e de projeto tradicionais não se aplicam fielmente a fabricação de moldes, preparação do material, moldagem e desmoldagem do GS (RIBEIRO; PURQUERIO, 1999).

Na fabricação da peça de GS existem etapas a serem realizadas antes mesmo da mistura dos agregados com o aglutinante. Primeiramente, como informa Rampf® (2022), deve-se limpar todas as peças do molde e aplicar uma camada de desmoldante.

Não é observado a presença de ângulos de saída em peças feitas de GS tal como nos projetos de moldes permanentes para fundição metálica, como constatou Ribeiro (1999), os moldes são feitos de forma a serem desmontados no processo de desmoldagem. Assim o projetista tem uma maior liberdade na hora de selecionar a geometria da peça a ser produzida em GS.

Insertos metálicos são inseridos nos moldes para serem ancorados no GS após a cura e fornecerem superfícies funcionais para montagem dos subsistemas mecânicos. Canais internos para sistemas elétricos, hidráulicos e pneumáticos também são aplicados (MCKEOWN; MORGAN, 1979).

Para que haja repetibilidade nas propriedades do GS, os componentes individuais que o compõe tais como resina, catalizador, aditivos e agregados de granito com granulometrias diferentes e definidas são cuidadosamente selecionados e misturados (LINTZ, 2003; RAMPF®, 2022).

Existe uma sequência de mistura para garantir a uniformidade do produto. O recomendado é realizar a mistura de todos os agregados separadamente. Realiza-se, então, a catálise da resina garantindo sua completa homogeneização em recipiente separado. É necessário garantir um mínimo de viscosidade e tensão superficial para garantir bons níveis de impregnação da resina nos agregados. Em seguida todos os componentes são misturados e homogeneizados, seguido pelo vazamento no molde, compactação e desaeração por meio de ações manuais ou com auxílio de mesa vibratória ou de câmara de vácuo (LINTZ, 2003; RAMPF®, 2022; TECH INGREDIENTS®, 2022).

De acordo com Rampf® (2022) no caso de usar moldes metálicos, deve-se isolar termicamente o molde e controlar sua temperatura. Devido a boa condutividade térmica dos metais, caso não haja um controle adequado de temperatura de resfriamento, as partes externas do GS que estão em contato com o molde irão se resfriar mais rápido fazendo que a temperatura da seção transversal da peça fique desigual provocando cura heterogênea.

O tempo de cura total varia conforme particularidades dos componentes de resina, endurecedores e aditivos selecionados. Rampf® (2022) observou um tempo de cura de doze a quatorze horas. Lintz (2003) atestou uma faixa de tempo de oito a dez horas com plena resistência mecânica e estabilidade volumétrica após cinco dias. A cura deve ser suficientemente lenta para permitir dissipar o calor e não gerar tensão residual dada a baixa condutividade térmica do GS.

Após a desmoldagem faz-se a limpeza e tratamento superficial do produto. Geralmente uma camada de primer é utilizada para um aspecto mais refinado e liso da superfície recém-construída (RAMPF®, 2022).

Ramnath, Thyla e Harishsharran (2020) indicam a necessidade de usinagem da peça de GS pós moldagem para correção dimensionais e geométricas a fim de possibilitar a montagem dos componentes da máquina-ferramenta.

Na busca por referências bibliográficas sobre o pós-processamento do GS, foram encontrados apenas dois trabalhos realizados por Kenda e Kopac (2009), Sapkal e Salunke (2017), Relea, Weiss e Wegner (2019), Ramnath, Thyla e Harishsharran (2020), Bahri *et al* (2021), Valea (2021), Ramnath e Thyla (2022). Entretanto, a aplicação do granito natural como material de construção estrutural de máquinas e equipamentos de precisão e ultraprecisão foi estudada com maior número de trabalhos publicados, destacando-se Chu *et al.* (2012), Cserta e Gyurika (2018), Relea, Weiss e Wegener (2019).

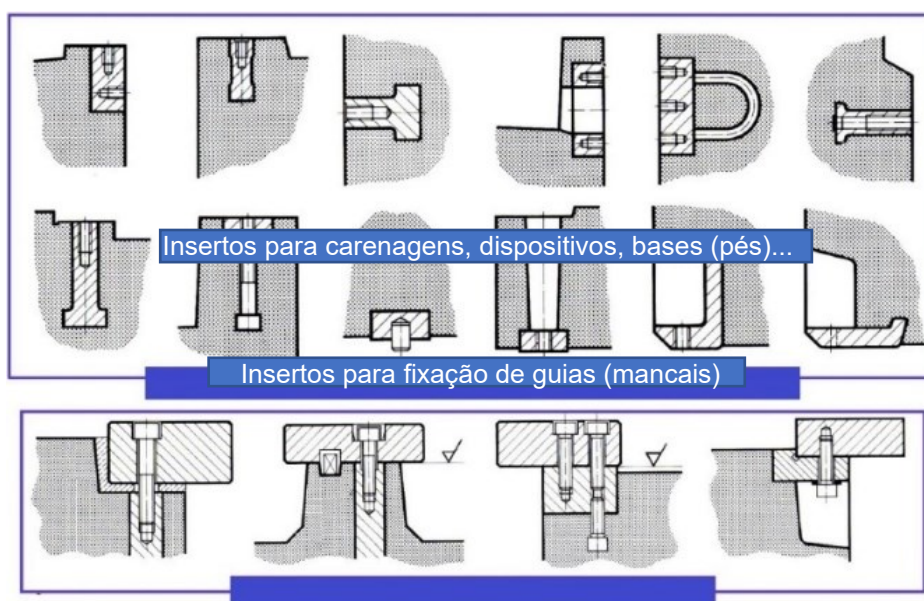
Para acabamento do granito natural, Sapkal e Salunke (2017), Valea (2021), Bahri *et al* (2021), Kenda e Kopac (2009), Relea, Weiss e Wegner (2019) empregaram processos abrasivos para remover material e controlar as tolerâncias dimensionais e geométricas da estrutura das máquinas e equipamentos.

A fabricante de equipamentos metrológicos de precisão Mitutoyo® (2020) usa o processo de lapidação com pastas abrasivas de diamante nas mesas de desempenho feitas de granito natural, a superfície de referência é rasqueteada após o processo de lapidação.

De acordo com Fernandes, Gadioli e Aguiar (2020) as propriedades mecânicas da rocha natural e sintética são similares, sendo assim, a usinagem do GS deve ser realizada por processos abrasivos, tipicamente encadeando retificação, lapidação e polimento para atender os estreitos requisitos de projeto.

Uma estrutura de máquina-ferramenta feita em GS necessita de elementos que possibilitem a criação de roscas para montagem dos periféricos que compõem a máquina. A forma mais direta e simples de o fazer é por meio de insertos metálicos, aos quais podem ser usinados de maneira convencional. Existem variadas formas e tipos de insertos aplicados em uma estrutura de máquina-ferramenta de GS. Exemplos de tipos de insertos, e a forma que são aplicados, estão demonstrados na Figura 2.7.

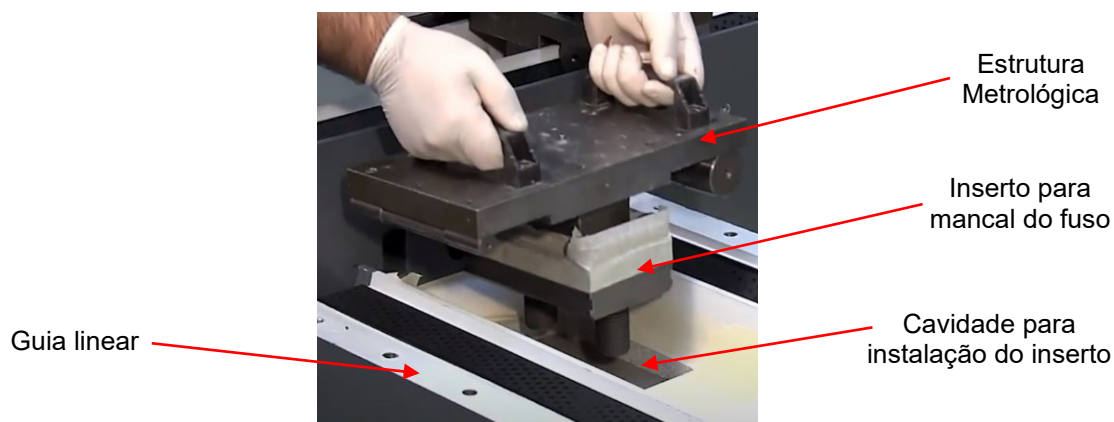
Figura 2.7 - Tipos de insertos e fixações de guias em estrutura de GS.



(Adaptado de FORTULAN, 2021).

Ribeiro *et al.* (1999) informam que, quando há tolerância de montagem entre insertos, não há necessidade de repassar tais requisitos para o molde. Ao invés, utiliza-se de dispositivos chamados de estruturas metrológicas ou gabaritos. Esses elementos são inseridos externamente no molde e servem de posicionadores para os insertos, podendo fazer parte ou não da peça. Studer (2021) utiliza-se de tais estruturas metrológicas no momento da fixação das guias na produção de sua estrutura de máquina-ferramenta feita de Granitan® (Figura 2.8).

Figura 2.8 - Estrutura metrológica aplicada para fixar os rolamentos nas posições corretas com exatidão de alguns centésimos de milímetros. Na imagem um funcionário da Studer posiciona o gabarito metrológico manualmente.



(Adaptado Studer, 2021).

2.3.1 MOLDES PERMANENTES E TEMPORÁRIOS.

Muitas vezes classifica-se o processo de fundição de metais de acordo com o molde utilizado (MORO; AURAS, 2007). Apesar das diferenças entre os processos de fundição metálica e os de produção de GS, as definições entre moldes permanentes e temporários permanecem iguais.

Sousa *et al.* (2011) definem molde permanente como aquele que pode ser utilizado repetidas vezes sem prejuízos ao resultado dos produtos fabricados durante a vida do molde. Studer (2021) relata que um único molde permanente pode produzir até mil estruturas de suas máquinas-ferramentas em Granitan®.

Moldes temporários ou colapsáveis são classificados dessa maneira por causa que seu uso único na produção de peças. Geralmente eles são quebrados para retirada do produto e, assim, inviabilizando seu reuso (IFRS, 2021; MONFERRATO, 2021).

2.3.2 PROJETO DE MOLDE

O molde é o dispositivo no qual se coloca o material de fabricação para que, após sua cura, se obtenha a peça no formato desejado (MORO; AURAS, 2007; EVANGELISTA; SILVA, 2022). Conforme observa Lintz (2003), os principais materiais de construção de moldes são os aços, alumínio ou madeiras.

Além de dar forma ao material vazado, o molde deve possuir rigidez, evitando deformação, e ser suficientemente bem montado para não desmontar ou distorcer durante sua passagem na mesa vibratória (Ribeiro; Purquerio, 1999).

Lintz (2003) utilizou fibra de vidro para criar um molde com boa rigidez e forma que foi utilizado com sucesso na produção de protótipos de estruturas de máquina-ferramenta com dimensões utilizadas na fabricação de torno mecânico.

O molde de uma peça é seu negativo, o que dificulta a visualização e conceituação. Por isso, o uso de ferramentas CAD é de suma importância tanto no projeto da máquina-ferramenta quanto do molde. O projeto do molde inicia por meio da subtração do modelo tridimensional da peça de um bloco sólido. Com esse modelo do molde pode-se analisar suas cavidades e realizar modificações tanto da geometria da peça quanto do molde e demais características inerentes a montagem e desmontagem do molde (RIBEIRO *et al.*, 1999).

2.4 SISTEMAS LINEARES

Por ser um elemento estrutural responsável por permitir o movimento relativo de componentes, ou conjunto de componentes, em um padrão determinado, os sistemas de guias devem ser suficientemente rígidos e favorecer a exatidão geométrica e dimensional da máquina (STOETERAU, 1992).

No caso de guias de translação o padrão de movimento é retilíneo e geralmente restrito a um grau de liberdade. As guias também são conhecidas por guias lineares. As guias que permitem movimentos rotativos são conhecidas como mancais rotativos (SILVA *et al.*, 2011; STOETERAU, 1992).

De acordo com Stoeterau (2004), as guias podem ser classificadas de quatro formas distintas; (1) quanto à forma da seção transversal, (2) quanto à forma de movimento, (3) quanto aos graus de liberdade e (4) quanto à forma de restrição à rotação ao longo do eixo de translação.

Sua classificação quanto à forma se restringe a dois tipos, prismática ou cilíndrica. Formas cilíndricas compõem sistemas de guias mais simples e tem várias aplicações em mecânica de precisão. Já formas prismáticas são amplamente utilizadas em máquinas-ferramentas e tem suas formas construtivas variadas. O elemento móvel que compõe o sistema de guias, cilíndricas ou prismáticas, envolve

total ou parcialmente o eixo da guia, ganhando uma classificação complementar de fechada ou aberta, respectivamente (STOETERAU, 2004).

A classificação de guias quanto a sua forma de deslizamento é reconhecida da seguinte maneira:

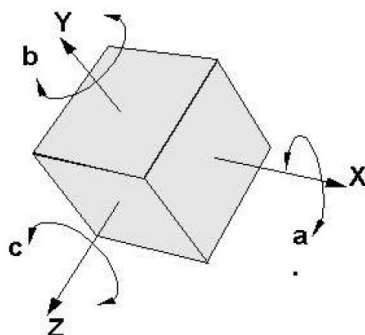
- Guias de deslizamento;
- Guias de elementos rolantes;
- Guias fluidostáticas (óleo, água, ar etc.);
- Guias de elementos elásticos; e
- Guias de levitação magnética.

Quanto a seus graus de liberdade, guia de deslizamento com deslocamento relativo linear na direção do eixo X, por exemplo, possui até seis graus de liberdade, dos quais cinco destes são indesejáveis. Somente o movimento ou translação ao longo do eixo X é desejável. Os seis graus de liberdade são:

- Rolamento: representa a rotação em torno do eixo X;
- Guinagem: representa rotação em torno do eixo Y;
- Arfagem ou cambamento: representa rotação em torno do eixo Z;
- Deslocamento na direção Y;
- Deslocamento na direção Z; e
- Deslocamento na direção X (desejável).

Na Figura 2.9 são ilustrados os graus de liberdade de um elemento.

Figura 2.9 - Referências para classificação dos graus de liberdade segundo a norma ISO-230.



(STOETERAU, 2004).

As guias ainda são classificadas quanto a prevenção contra rotação do componente móvel em torno do eixo de translação ou a não prevenção, podendo ocorrer por meio de restrição interna ou externa.

2.4.1 GUIAS DE ELEMENTOS ROLANTES

Esse tipo de conceito foi originalmente patenteado na França em 1932. São caracterizadas por possuírem seção transversal retangular e um corpo em forma de caixa que contém passagens para elementos recirculantes (SLOCUM, 1992). Esse corpo é denominado de patim (HIWIN, 2020; BOSCH REXTOTH, 2022; KALATEC, 2022; NSK, 2022)

Atualmente existem vários fabricantes que adotam diferentes geometrias, disposição e forma dos elementos rolantes com destaque da substituição de esferas por cilindros a fim de aumentar a capacidade de carga e rigidez (SCHAEFLER, 2007; HIWIN, 2020; AZETEK, 2022; BOSCH REXTOTH, 2022; FLI, 2022; KALATEC, 2022; NSK, 2022).

De forma a constituir um eixo móvel em uma máquina-ferramenta, duas guias paralelas e quatro patins são tipicamente usados (Figura 2.10).

Figura 2.10 - Configuração básica típica na formação de um eixo funcional de uma máquina-ferramenta.

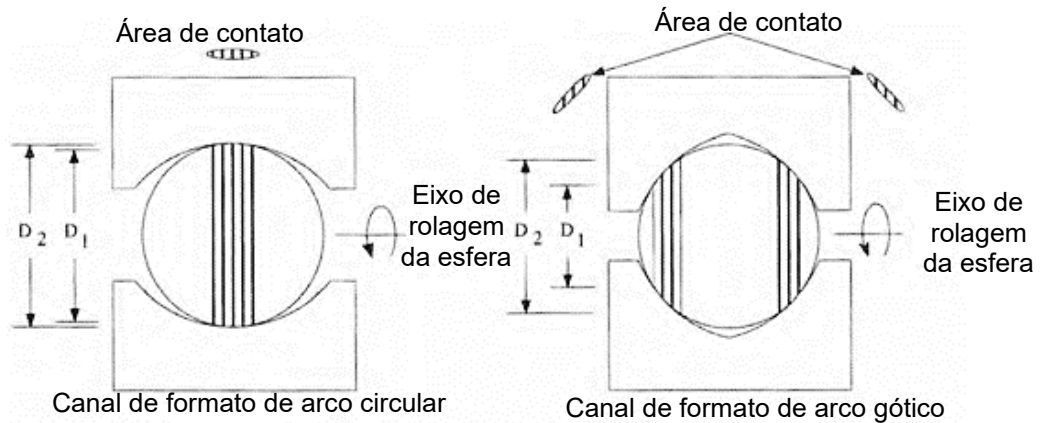


(Adaptado de HIWIN®, 2020).

Na construção de guias lineares de esferas recirculantes há dois tipos construtivos de canais tipicamente adotados pelos fabricantes; canais de arcos circulares e canais de arcos góticos. Em ambos os casos existem vantagens e desvantagem, afetando basicamente a capacidade de carga, rigidez e coeficiente de

atrito dinâmico e estático (SLOCUM, 1992). Na Figura 2.11 os contatos circulares e góticos são mostrados.

Figura 2.11 - A direita contato do tipo esférico e à esquerda contato do tipo gótico em guias lineares.



(Adaptado de SLOCUM, 1992).

De acordo com a fabricante HIWIN® (2020) o sistema de guias de elementos rolantes traz algumas vantagens sobre o sistema de guia de deslizamento tradicional, são elas:

- Atrito 50 vezes menor;
- Exatidão de posicionamento elevada (devido ao baixo atrito);
- Elevada durabilidade;
- Maior velocidade de translação;
- Menores forças;
- Capacidade de suportar cargas em todas as direções;
- Facilidade de lubrificação; e
- Intercambialidade entre guias e patins.

A substituição de guias de deslizamento por guias de elementos recirculantes implica em menor atrito, menor gasto energético ao proporcionar movimento, facilidade de manutenção e reposição de peças danificadas, maior velocidade de trabalho, melhor acabamento, melhor exatidão de posicionamento e baixa transformação em calor (STOETERAU, 1992).

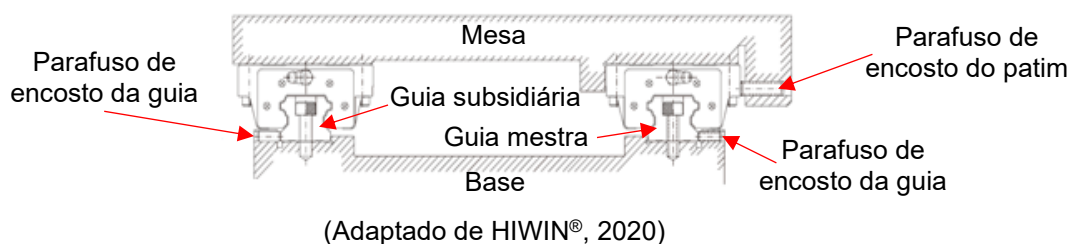
Para selecionar guia linear a fabricante HIWIN® (2020) sugere os seguintes passos:

1. Identificar as condições: tipo de equipamento, limitações de espaço, exatidão, rigidez, faixa nominal, magnitude e direção de cargas, velocidade e aceleração, ciclo de trabalho, tempo de serviço e ambiente;
2. Selecionar a série: categoria e aplicação de cada série, cabe ao projetista identificar e selecionar adequadamente conforme a aplicação de projeto;
3. Seleção da exatidão: decisão da classe da guia ao qual a exatidão do equipamento estará diretamente relacionada;
4. Determinar o tamanho e quantidade de patins: por meio da condição de carga dinâmica. Caso haja o uso de fuso de esferas recirculantes, a dica é usar guia com o tamanho similar ao diâmetro do fuso;
5. Calcular a carga máxima aplicada no patim: garantir que o fator de segurança estático da guia selecionada seja maior que o fator de segurança calculado;
6. Escolha da pré-carga: dependerá da rigidez e exatidão requerida da superfície de montagem;
7. Identificar a rigidez: calcular a deformação e escolher maiores valores de pré-carga e guias mais largas para atingir tal rigidez;
8. Calcular tempo de serviço: frequência e velocidade de movimento e demais dados de projeto para cálculo da vida da guia; e
9. Selecionar a lubrificação: graxa ou óleo.

Entre os passos dois e oito não há exatamente uma escolha linear e rápida, dificilmente isso ocorrerá, o mais frequente é haver iterações até atingir a configuração que melhor se encaixe nas necessidades do projeto (HIWIN®, 2020).

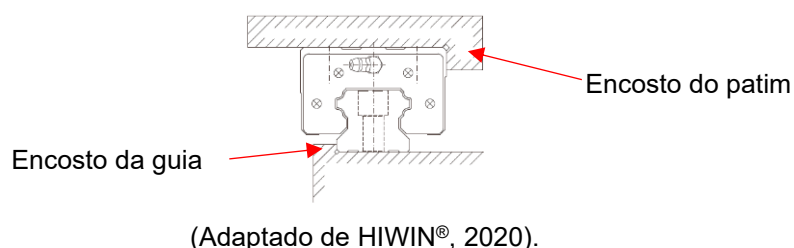
Após todo o processo de seleção de guias e patins de nada valerá o esforço se não for realizado corretamente a montagem deles. A fim de atingir o máximo de precisão e rigidez recomenda-se configuração de montagem que podem levar em consideração restrições e preparação de superfícies funcionais, como exemplificado na Figura 2.12 (HIWIN®, 2020).

Figura 2.12 - Configuração de montagem para o máximo de exatidão e rigidez.



Diferentes configurações podem ser aplicadas em função da aplicação. Alguns tipos são destacados nas Figuras 2.13, 2.14 e 2.15 (HIWIN®, 2020).

Figura 2.13 - Uso de uma guia e um lado de referência na montagem.



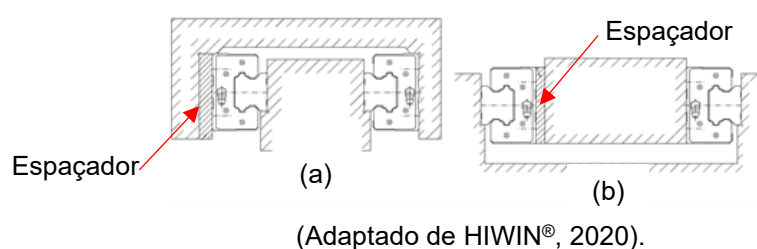
No caso de uso de duas guias lineares com patins na horizontal o arranjo poderá ser feito de duas formas (Figura 2.14).

Figura 2.14 - (a) configuração de patins móveis e (b) configuração de patins fixos.



Na próxima configuração de montagem, Figura 2.15, tem-se guias e patins na vertical com guias externas e internas.

Figura 2.15 - Montagem com (a) guias externas e (b) guias internas.

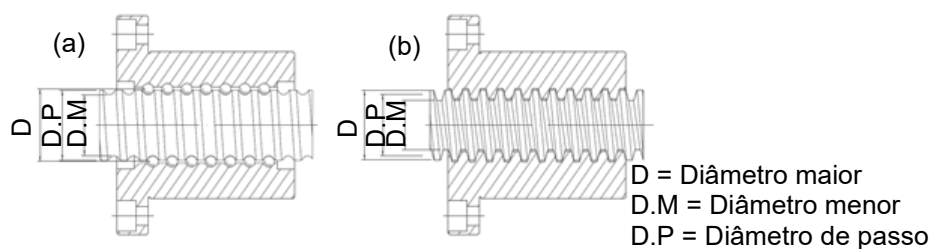


2.4.2 FUSO DE ELEMENTOS RECIRCULANTES

A conversão de movimento angular em linear promovido por um fuso e uma porca tem sido utilizado por séculos, como explica Slocum (1992). Quando se bloqueia o movimento de rotação da porca, enquanto se gira o fuso, fará a porca se mover ao longo do fuso, e vice-versa. Esse sistema é aplicado em diversas máquinas associado a motor rotativo eletromagnético devido ao menor custo em comparação com motores lineares eletromagnéticos.

Com séculos de desenvolvimento nesse sistema de conversão de movimento surgiram sistemas mais precisos, de melhor exatidão e menos ruidosos. Uma das soluções promovidas pela fabricante HIWIN® consiste em adicionar esferas entre o fuso e a porca eliminando o batimento, trazendo alta eficiência, reversibilidade, alta rigidez e exatidão. Na Figura 2.16 são apresentados (a) fuso de esferas recirculantes e (b) fuso trapezoidal de deslizamento.

Figura 2.16 - (a) fuso de esferas recirculantes e (b) fuso trapezoidal de deslizamento convencional.



(Adaptado de HIWIN®, 2018).

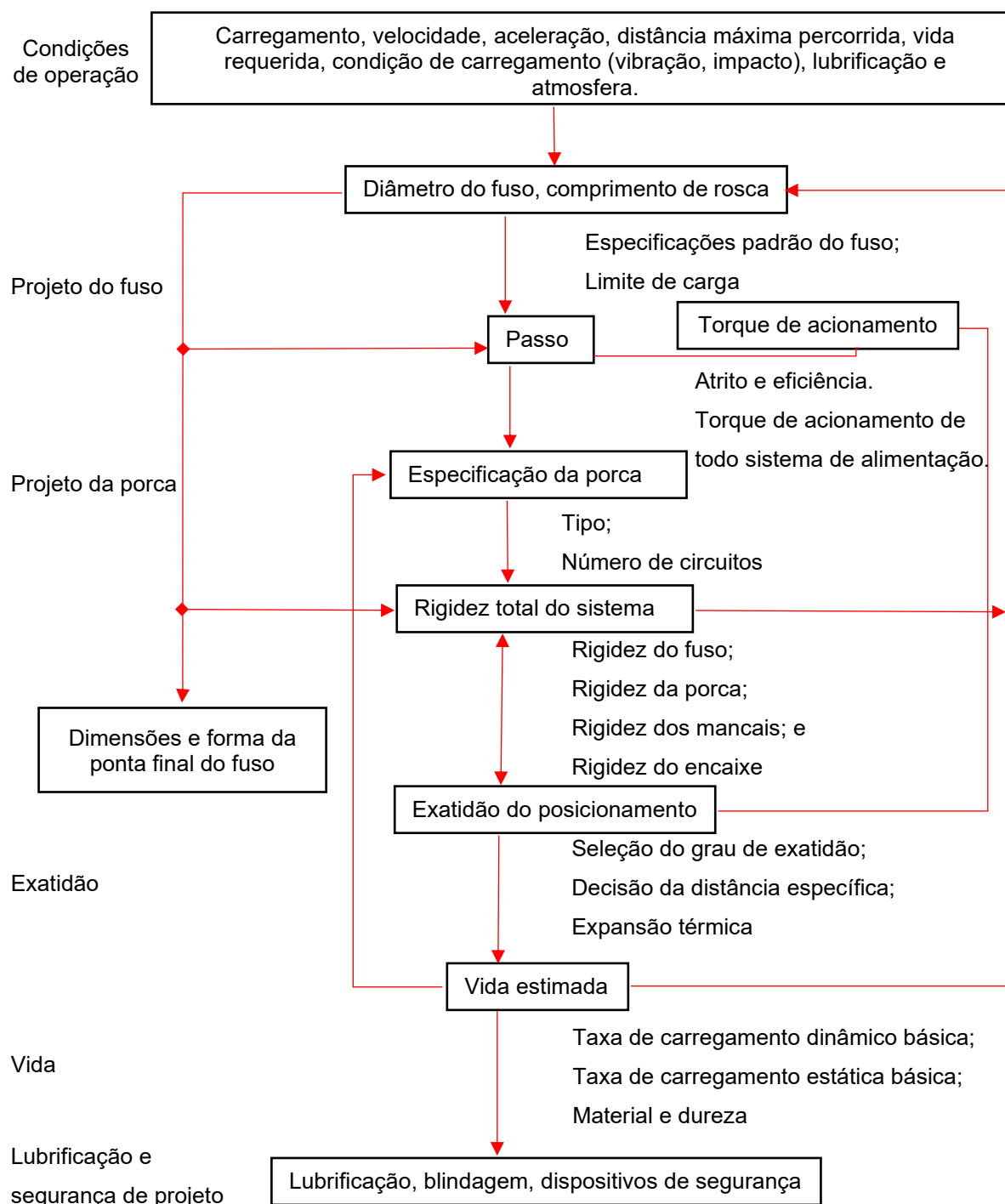
Sendo o tipo mais comum usado nas máquinas industriais de precisão, fusos de esferas recirculantes possuem repetibilidade na ordem de 1 μm e tipos especiais conseguem ter resolução submicrométrica de posicionamento. Sua alta eficiência se dá pelo uso de esferas (que podem ou não estarem separadas por espaçadores) a fim de transferir carga do fuso para as roscas da porca (SLOCUM, 1992).

As aplicações dos fusos de esferas recirculantes são para as mais variadas máquinas, com destaque para as máquinas-ferramentas CNC, por exemplo, centros de usinagem, tornos, fresadoras, eletroerosionadeiras por penetração e a fio, retificadoras, geradoras de engrenagens, furadeiras e aplainadoras (HIWIN®, 2018).

Segundo Slocum (1992), os fabricantes possuem programas para auxiliar o engenheiro projetista a selecionar o melhor fuso para sua aplicação. É uma prática válida e recomendada estudar os processos de seleção antes de procurar um

fabricante. O ganho de experiência promovido pelo aprendizado do processo de seleção ajuda a fazer as perguntas certas e aumenta as chances de conseguir selecionar o melhor produto para a aplicação desejada. Um exemplo de procedimento de seleção de fuso de esferas recirculantes é mostrado na Figura 2.17.

Figura 2.17 - Procedimento de seleção de fusos de esferas recirculantes.

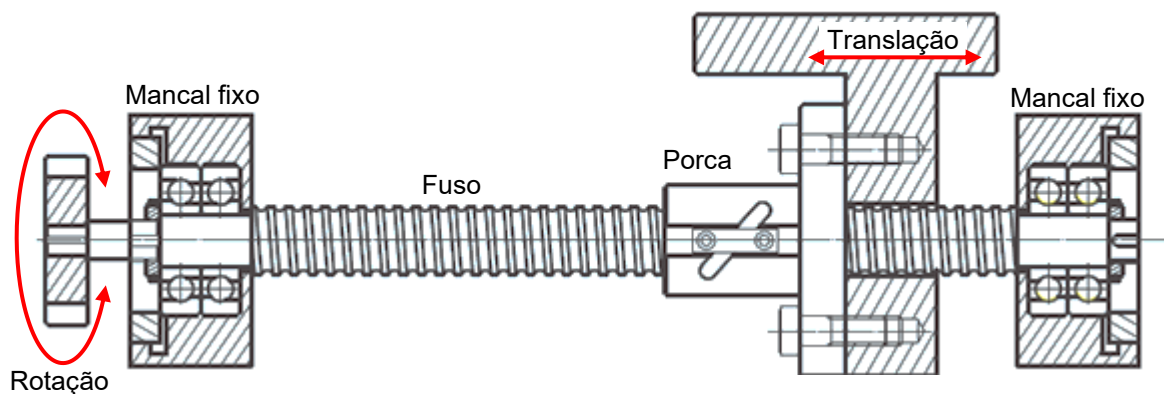


(Adaptado de NSK CORP^{®1}, apud SLOCUM, 1999).

¹ NSK CORP[®], s.d.

Para atingir a maior rigidez de montagem a fabricante de fusos de esferas recirculantes HIWIN® (2018) recomenda a montagem do fuso com apoio em mancais fixos, com rolamentos de contato angular, nas duas extremidades. Na Figura 2.18 é apresentado desenho técnico da montagem.

Figura 2.18 - Montagem do fuso de esferas recirculantes com ambas as pontas fixadas.



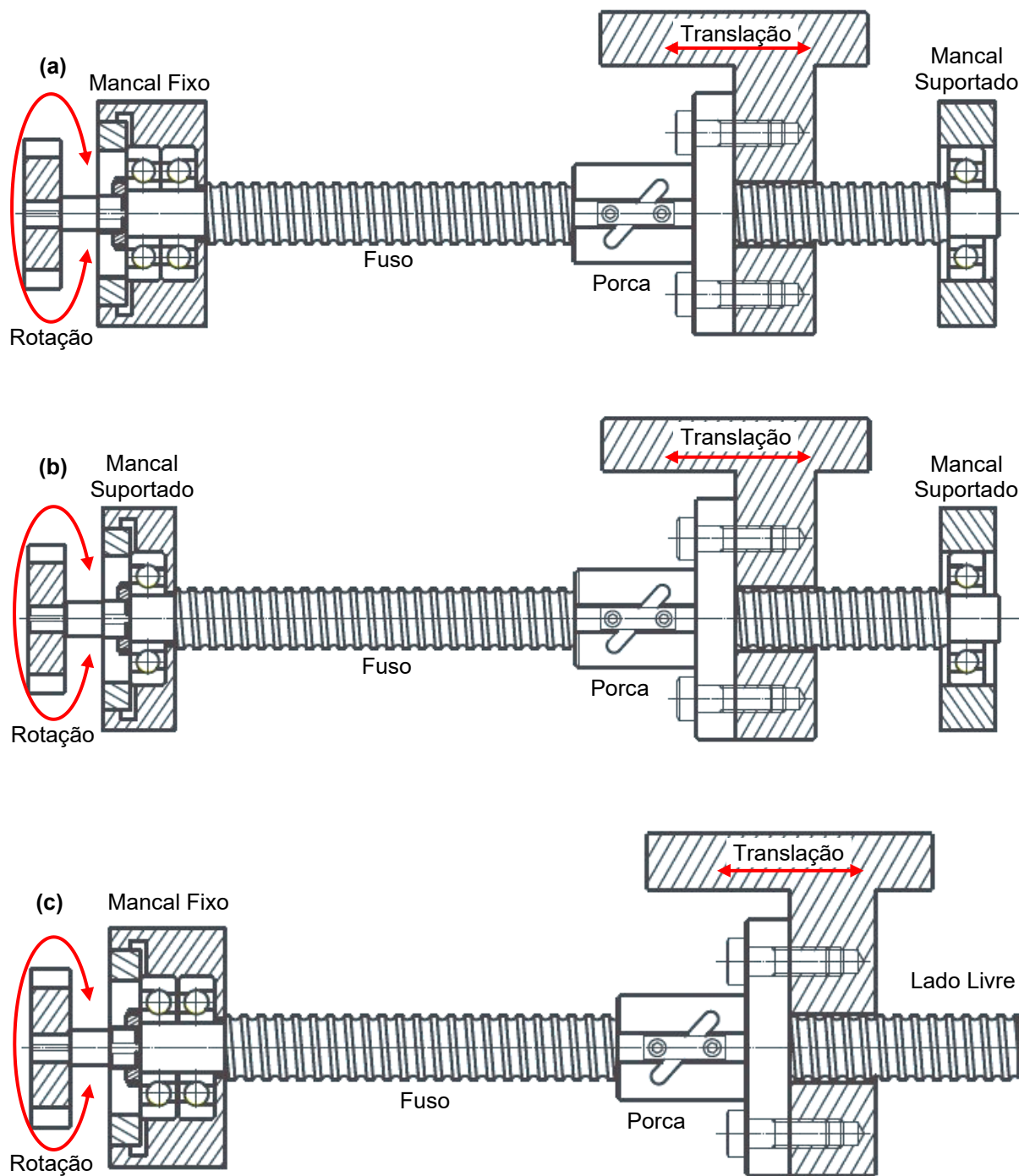
(Adaptado de HIWIN®, 2018).

Na montagem biapoiada em mancais fixos (Figura 2.18) é aplicada pré-carga de tensão de tração no fuso para, quando houver dilatação térmica no sistema, evitar que o fuso entre em compressão (SLOCUM, 1999).

Slocum (1999) recomenda montar os fusos de esferas recirculantes com desalinhamento radial de no máximo $20\ \mu\text{m}$ e desalinhamento angular de no máximo $200\ \mu\text{rad}$ para não comprometer a vida do sistema mecânico. Caso a frequência de rotação seja igual a frequência natural de flexão do fuso ocorre a vibração autoexcitada (*shaft whip*). Visto que o fuso é dotado de um desbalanceamento, a vibração é amplificada. Assim, recomenda-se que a rotação máxima do fuso seja inferior ao seu primeiro modo de vibração.

Na Figura 2.19 são apresentados outros três diagramas de montagem de fusos de esferas recirculantes e mancais. Os sistemas apresentam em ordem decrescente menores (em relação a Figura 2.18) rigidez, custo de aquisição e custo de montagem da Figura 2.19a a 2.19c (HIWIN®, 2018).

Figura 2.19 - Exemplos de montagem de mancais em fusos de esferas recirculantes. (a) lado esquerdo com mancal fixo e lado direito com mancal suportado. (b) Ambos os lados com mancais suportados. (c) lado esquerdo com mancal fixo e lado direito livre.

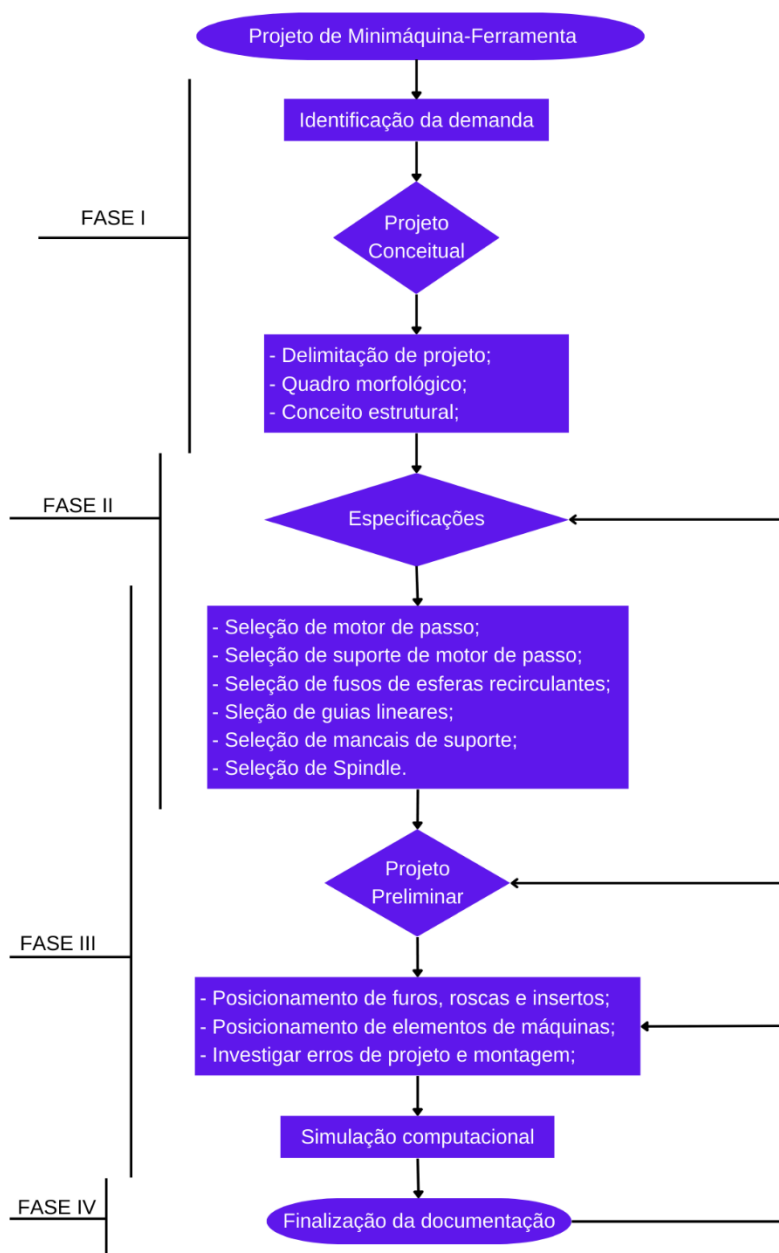


(Adaptado de HIWIN®, 2018).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia de projeto desta pesquisa foi baseada em Pahl e Beitz (1988, 2013). Na Figura 3.1 apresenta-se o fluxograma das etapas de projeto da minimáquina-ferramenta multifuncional CNC.

Figura 3.1- Fluxograma do projeto de minimáquina-ferramenta multifuncional CNC de GS.



As atividades de projeto foram realizadas a partir do levantamento bibliográfico e experiência do grupo de pesquisa relacionado ao projeto mecânico e construção de máquinas-ferramentas de precisão considerando os materiais, geometria e principais elementos dos sistemas lineares. Logo após a identificação da demanda foram estabelecidas as condições de contorno do projeto mecânico e foi definido o conceito da geometria estrutural da minimáquina-ferramenta.

Sabendo das necessidades de projeto, foram selecionados os elementos de máquinas e realizados ciclos iterativos de projetos preliminares visando a evolução gradual da estrutura principais de GS e os subcomponentes estruturais visando uma minimáquina-ferramenta multifuncional CNC capaz de realizar operações aditivas e subtrativas de manufatura. As análises estáticas foram realizadas por meio de simulação computacional empregando análise de elementos finitos.

O projeto foi dividido em quatro fases (Fig. 3.1), detalhadas nos subcapítulos a seguir, quais sejam: (3.1) identificação da demanda, (3.2) projeto conceitual, (3.4) projeto preliminar e (3.5) simulação computacional.

3.1 IDENTIFICAÇÃO DA DEMANDA

Sem qualquer tipo de avanço sólido na produção tecnológica de minimáquina-ferramentas de precisão fora do meio acadêmico no Brasil, a indústria nacional supre sua demanda no mercado estrangeiro. Com consciência deste cenário, o presente trabalho visa se lançar como um projeto de atendimento a demanda de mercado e propiciar avanços científicos e tecnológicos dentro da área de desenvolvimento de minimáquinas-ferramentas de precisão buscando uma plataforma idealizada para desempenhar múltiplos processos subtrativos e aditivos, conferindo multifuncionalidade e realização de processos híbridos de manufatura com estrutura de GS otimizada, com características de: rigidez de $100 \text{ N}/\mu\text{m}$, elevado coeficiente de amortecimento, estabilidade dimensional e geométrica, redução dos custos de fabricação, montagem e manutenção. A pesquisa possui financiamento da FAPEMIG por meio do Projeto de Pesquisa APQ-01759-17 e apresenta os avanços do Projeto de Fim de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica iniciado por Rodrigues (2022).

3.2 PROJETO CONCEITUAL

A etapa do desenvolvimento do projeto conceitual foi subdividida em três subseções (3.2.1) delimitação do projeto, (3.3.1) motor eletromagnético, (3.3.2) seleção fuso de esferas recirculantes e (3.3.3) seleção de guias lineares.

3.2.1 DELIMITAÇÃO DO PROJETO

As condições de contorno adotadas nesta pesquisa foram baseadas em trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), experiência do grupo de pesquisa e revisão bibliográfica do estado da arte relacionado ao projeto de máquinas-ferramentas. As condições adotadas foram:

- Metodologia baseada em Rodrigues (2022);
- Sistema de coordenadas cartesianas: três eixos de translação ortogonais entre si e um eixo de rotação (ferramenta) paralelo a um dos eixos de translação;
- Geometria inspirada na máquina KERN MICRO HD®;
- Previsão de superfícies funcionais para atualização futura do quarto e quinto eixos;
- Envelope útil de trabalho de dimensões 400 mm x 400 mm x 400 mm;
- Rigidez estática de laço estrutural de 100 N/ μ m;
- Otimização geométrica para redução mássica estrutural, objetivando minimizar o custo de material e considerações quanto ao projeto do molde e fabricação da estrutura (facilidade de fabricação, desmoldagem, complexidade geométrica, tolerâncias dimensionais e geométricas, usinagem da estrutura, insertos metálicos e alinhamentos e referenciamentos das superfícies funcionais);
- Estrutura principal de GS (propriedades na Tabela 3.1);
- Sistemas lineares constituídos por guias lineares de rolos recirculantes e fusos de esferas recirculantes e mancais de apoio com rolamentos de contato angular montados com pré-carga. Projeto da estrutura visando

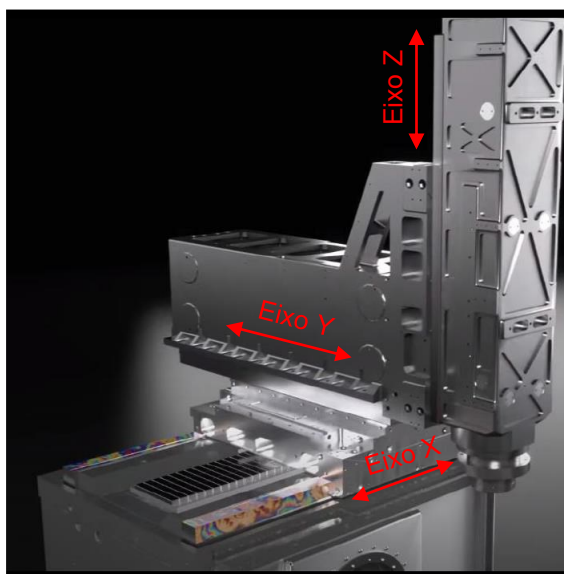
modificações futuras para substituição por motores lineares de indução eletromagnética e mancais aerostáticos;

- Para efeito de dimensionamento da estrutura, o cabeçote ou *spindle* (SP) foi considerado como corpo ideal (sem deformação) engastado na estrutura; e
- Estrutura base engastada e esforços aplicados no SP considerando a ação da gravidade.

Rodrigues (2022) mostrou em seu trabalho as vantagens que levam os fabricantes a escolherem o uso de estruturas do tipo C e Portal na construção de máquinas-ferramentas de precisão e ultraprecisão. As vantagens residem no compromisso de resistência mecânica, facilidade de fabricação e menor custo de produção. Assim, elucida sobre a tendência de mercado em selecionar esses dois tipos de estruturas para máquinas-ferramentas.

Seguindo as constatações de Rodrigues (2022), foi selecionado a estrutura do tipo portal simétrica na construção da minimáquina-ferramenta. Essa estrutura está presente na máquina KERN MICRO HD® (Figura 3.2), que possui três eixos ortogonais, três eixos de rotação, sendo um deles a ferramenta rotativa. Tal máquina foi a inspiração para a estrutura proposta nesta pesquisa.

Figura 3.2 - Estrutura de referência da KERN MICRO HD do tipo portal simétrico escolhida para desenvolvimento do projeto mecânico em GS.



(Adaptado de KERN, 2021).

A rigidez estática de laço estrutural da máquina é medida a partir do deslocamento da ponta do SP em relação a estrutura da máquina-ferramenta. Valores típicos de rigidez estrutural estática estão discretizados na Tabela 3.1 (LACALLE; LAMIKIZ, 2009).

Tabela 3.1 - Valores típicos de rigidez estrutural de máquinas-ferramenta.

Arranjo Construtivo	X (N/μm)	Y (N/μm)	Z (N/μm)
Tipo C	62	33	67
Portal Simétrico	16	40	93,7
Máquina 3 eixos geral	15 - 25	15 - 25	70 - 100

(Adaptado de LACALLE; LAMIKIZ, 2009).

Lasparas *et al.* (2020) indicam valores de rigidez quase estático para uma máquina-ferramenta de cinco eixos, quais sejam: 9 N/μm a 15 N/μm para o eixo X, 10 N/μm a 15 N/μm para o eixo Y e 80 N/μm a 87 N/μm para o eixo Z. Pan *et al.* (2005) sugerem rigidez estrutural típica para máquinas CNC de 100 N/μm e rigidez de processo de usinagem tipicamente de 0,1 N/μm a 1 N/μm. Considerando essas informações e experiência do grupo foi definido a rigidez estática de projeto da estrutura montada com os subcomponentes de 100 N/μm.

O material escolhido para compor a estrutura principal da máquina-ferramenta foi o GS. As propriedades consideradas são apresentadas na Tabela 3.2 baseadas em Ates e Gerger (2013), Kepczak e Pawlowski (2013), Lovo *et al.* (2018) e Rodrigues (2022).

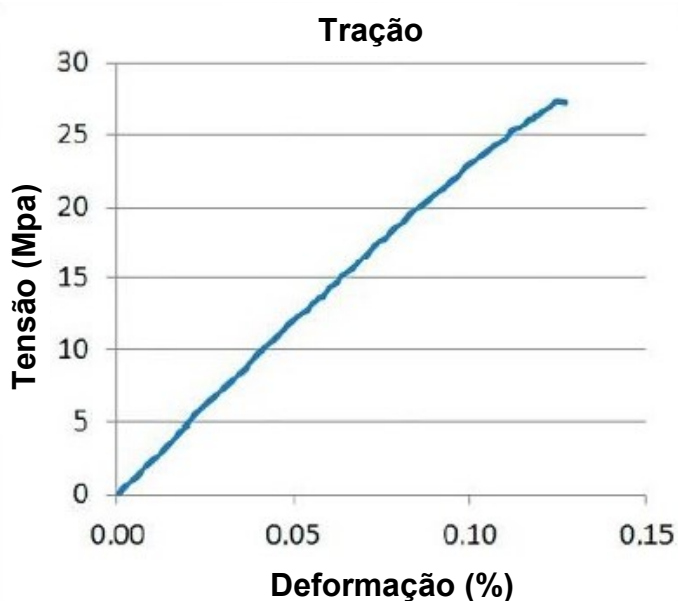
Tabela 3.2 - Propriedades do GS.

Densidade (ρ) [Kg/m³]	2 300,00	Kepczak e Pawlowski (2013)
Módulo de elasticidade (E) [GPa]	23,40	Lovo <i>et al.</i> (2018)
Limite de escoamento [MPa]	21,00	Lovo <i>et al.</i> (2018)
Coeficiente de Poisson (ν)	0,20	Ates e Gerger (2013)
Resistência a Tração (σ_t) [MPa]	27,00	Lovo <i>et al.</i> (2018)
Resistência à Compressão (σ_c) [MPa]	103,00	Lovo <i>et al.</i> (2018)
Resistência a Flexão (σ_o) [MPa]	42,00	Lovo <i>et al.</i> (2018)
Coeficiente de Amortecimento (ξ)	0,018	Lovo <i>et al.</i> (2018)
Capacidade Térmica (C) [J/(Kg*K)]	1,10	Kepczak e Pawlowski (2013)
Condutividade Térmica (k) [W/(m*K)]	1,20	Lovo <i>et al.</i> (2018)
Coeficiente de Dilatação Térmica (α_0) [10⁻⁶/K]	20,00	Kepczak e Pawlowski (2013)

(ATES; GERGER, 2013; KEP CZAK; PAWLOWSKI, 2013; LOVO *et al.*, 2018; RODRIGUES, 2022).

As propriedades mecânicas do GS apresentadas na Tabela 3.2 não contemplam o limite de escoamento do compósito, o qual foi extraído da curva tensão-deformação (Figura 3.3) obtida por LOVO *et al.* (2018) para fins de projeto e análise de elementos finitos.

Figura 3.3 - Curva tensão-deformação do GS no ensaio de tração em máquina universal modelo Bionix brand MTS®. Composição mássica de 55 % de brita grossa (1,2 mm a 2,0 mm), 15 % de brita média (0,3 mm a 0,6 mm), 35 % de brita fina (0,1 mm a 0,2 mm) e 19 % de resina epóxi.

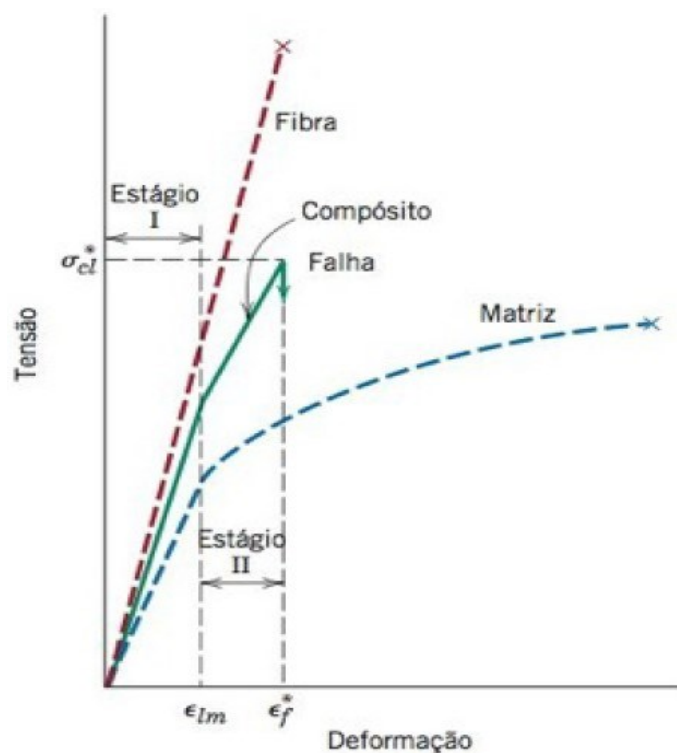


(LOVO *et al.*, 2018).

Segundo Callister (2012), compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras contínuas submetidos à tração uniaxial possuem dois estágios característicos na curva tensão-deformação (Figura 3.4). No Estágio I ocorre a deformação puramente elástica da matriz e da fibra e, assim, normalmente esse estágio define uma região linear. O Estágio II, por sua vez, acontece quando a matriz escoar e se deforma plasticamente, enquanto as fibras continuam a se alongar elasticamente. A inclinação da curva nesse segundo estágio sofre redução. Assim, os estágios são definidos por meio dos diferentes valores do módulo de elasticidade presentes na curva.

Esse modelo foi considerado para determinação de propriedade mecânica do GS substituindo-se as fibras contínuas pelos agregados homoganeamente dispersos na matriz de resina epóxi.

Figura 3.4 - Curva tensão-deformação esquemática para um compósito de matriz polimérica reforçado com fibras contínuas alinhadas submetido a tensão uniaxial aplicada na direção do alinhamento.

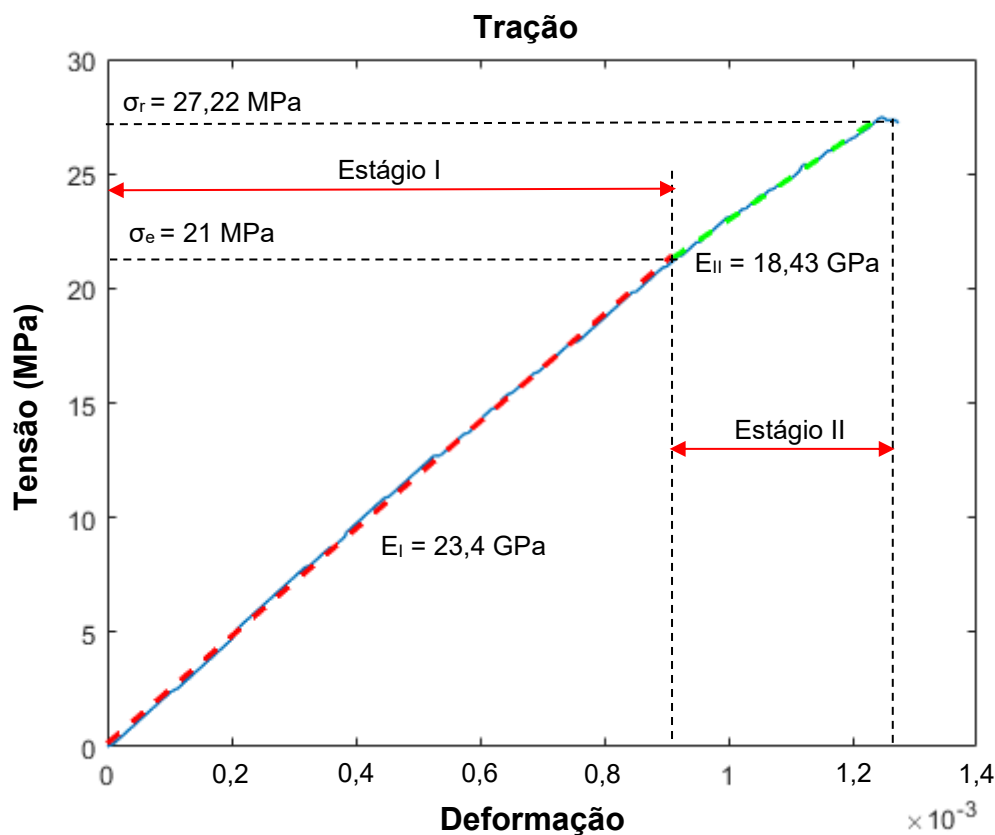


(CALLISTER, 2012)

Como é de interesse que o GS seja solicitado no regime puramente elástico, tanto para o agregado e principalmente para a matriz de menor resistência à tração, foi determinada a tensão máxima do Estágio I ou tensão de transição do Estágio I para o Estágio II.

Empregando o programa GetData Graph Digitizer® os pontos da curva tensão-deformação (Figura 3.3) foram extraídos e tratados no programa MatLab®. Inicialmente, os valores de deformação em porcentagem (%) de deformação foram transformados em decimais. Em seguida, valendo-se do comando *polyfit*, foram calculadas as equações polinomiais de grau um referente aos dois Estágios e traçada a curva tensão-deformação apresentada na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Curva tensão-deformação do GS extraída de Lovo *et al.* (2018). A linha tracejada vermelha representa o Estágio I e a tracejada verde o Estágio II.



Callister (2012) afirma que para compósitos com agregados grandes, maiores que $1 \mu\text{m}$, há transferência de carga da matriz para o agregado. Lovo *et al.* (2018) observaram que no ensaio de tração unidirecional, os corpos de prova de GS tiveram resistência à tração menor comparado ao da resina pura e com fratura transgranular, apontando que para esforços de tração a fase polimérica é a principal responsável pela resistência mecânica do compósito. Sendo assim, o limite de escoamento calculado, por meio do modelo proposto, de 21 GPa, está em consonância com os valores de resistência à tração de resina epóxi e tensão máxima admissível de projeto de GS, conforme apontado por Rodrigues (2022), garantindo que o compósito seja solicitado apenas elasticamente.

Foi considerada a força de usinagem de 100 N em cinco condições de atuação na estrutura, cada condição entendida como sendo crítica para o projeto estrutural. Na Tabela 3.3, as cinco condições de esforços decompostas em seus respectivos eixos são apresentadas.

Tabela 3.3 - Força resultante para simulação das condições críticas de projeto devido à força de usinagem.

Caso	Eixo X (N)	Eixo Y (N)	Eixo Z (N)	Ação da gravidade
1	0	100	0	Não
2	0	0	0	Sim
3	0	100	0	Sim
4	0	0	-100	Sim
5	70,711	50	-50	Sim

No Caso 1 foi considerado somente a atuação da força de usinagem de módulo 100 N no sentido positivo do eixo Y, sem a influência da gravidade. Essa condição de contorno possibilitou a análise do laço estrutural da minimáquina-ferramenta, onde o objetivo foi uma rigidez de laço de 100 N/ μm .

No Caso 2 foi considerado somente a ação da gravidade sobre a minimáquina-ferramenta. O objetivo foi analisar as deformações e tensões causadas pelo peso próprio da estrutura da minimáquina-ferramenta.

No Caso 3, por sua vez, foi considerado o efeito combinado da força de usinagem e da gravidade. Assim, foi aplicada força de usinagem de módulo 100 N no sentido positivo do eixo Y.

No Caso 4 foi analisado o efeito combinado da força de usinagem e da gravidade, porém com força de usinagem de módulo 100 N no sentido negativo do eixo Z.

No Caso 5 foi analisado o efeito combinado da força de usinagem e da gravidade, com resultante de 100 N decomposta nos três eixos cartesianos.

O estado crítico real foi analisado com as forças gravitacionais e de usinagem combinadas, nessa condição buscou-se atingir um fator de segurança maior que 3 considerando o limite de escoamento do material.

O local com maior deformação foi definido como ponto crítico da máquina (PCM).

As definições quanto ao tipo e localização dos engastamentos na estrutura para simulação serão detalhados no Capítulo 3.4.

3.2.2 QUADRO MORFOLÓGICO

Com as delimitações do projeto definidas foi realizado o estudo morfológico com o objetivo de buscar por melhores soluções para atender aos requisitos. No quadro morfológico os parâmetros de projeto são apresentados na primeira coluna da esquerda e nas linhas a frente se encontram as possíveis soluções. As escolhas estão indicadas e interconectadas. Na Tabela 3.4 é apresentada a análise morfológica.

Tabela 3.4 - Quadro morfológico da minimáquina-ferramenta multifuncional CNC.

Sistemas de coordenadas	Cartesiana	Cilíndrica	Polar
Graus de Liberdade	Três eixos de translação e uma ferramenta rotativa	Três eixos de translação, um eixo de rotação e uma ferramenta rotativa	Três eixos de translação, dois eixos de rotação e uma ferramenta rotativa
Material da Estrutura	Ferro Fundido	Granito Natural	Granito sintético
Forma da Estrutura	"C" simétrico	"L" Parafuso	Portal simétrico
Material do Flange XY	Aço 1045	Aço Inoxidável	Alumínio
Guias Lineares	Rolos recirculantes	Aerostáticas	Hidroestáticas
Fusos dos eixos lineares	Esferas recirculantes	Barra roscada	Perfil Trapezoidal
Mancais do fuso	Fixo - Fixo	Fixo - Suportado	Suportado - Suportado
Parafusos	Sextavado	Allen	Fenda
Local de aplicação das forças de usinagem	Estrutura para simular cabeçote de usinagem	Cabeçote de usinagem	Local de acoplamento do cabeçote de usinagem
Cabeçote	Montagem modular	Aerostático acionado por motor elétrico	De rolamento acionado por motor elétrico

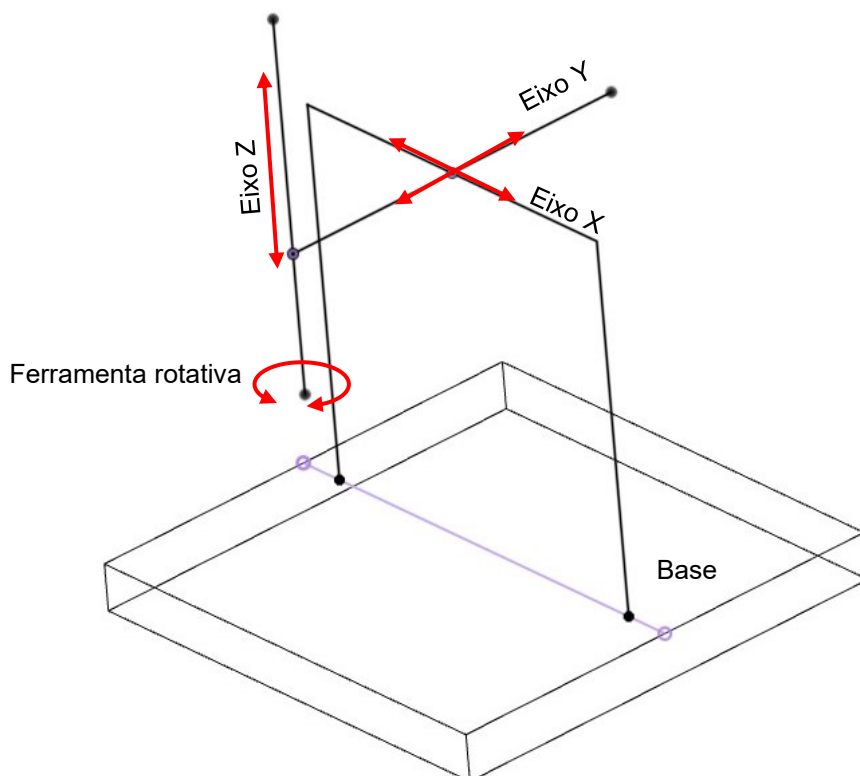
A escolha pela configuração geométrica portal simétrico é consequência dos resultados encontrados por Rodrigues (2022) com compromisso entre rigidez, distribuição de massa e facilidade de fabricação dos moldes, moldagem, desmoldagem, montagem (acessos) e alinhamento dos componentes. Além disso, as principais características geométricas foram baseadas no centro de usinagem da Kern Micro HD. Trata-se de equipamento mundialmente reconhecido por seu desempenho e que emprega a geometria de portal simétrico e GS na estrutura base.

A estrutura principal também foi concebida para futuramente receber subsistemas de quarto e quinto eixos e outro cabeçote para operação de torneamento, entretanto não serão objetos de estudo e detalhamento nesta pesquisa.

3.2.3 CONCEITO ESTRUTURAL

O conceito da estrutura portal simétrico (EPS) está representado na Figura 3.6. O projeto conceitual da Figura 3.6 elucidada a estrutura da minimáquina-ferramenta. Com o portal fixo e suportando todos os eixos e seus respectivos subsistemas, o cabeçote e a ferramenta rotativa, não há mudança significativa no carregamento estático dos eixos. Essa configuração permite maior previsibilidade das massas e centros de massa móveis e, conseqüentemente, das massas inerciais. Assim, a geometria, dimensões e massas finais foram otimizadas para minimizar o efeito da gravidade na distorção da estrutura por todo o volume de trabalho.

Figura 3.6 - Conceito de estrutura portal simétrico (EPS) em perspectiva.



A capacidade de controle sobre as variáveis de inércia, potência e configuração/otimização dos motores dos eixos, laço estrutural e posicionamento dos eixos que essa configuração de estrutura permite faz dela uma aplicação interessante na construção de máquinas-ferramentas de precisão. Alterando-se a altura da plataforma/dispositivo de fixação da peça, que no estágio atual do projeto ficará estático, também se altera o laço estrutural.

3.2.4 ESPECIFICAÇÕES

Nesse capítulo foi discutido a seleção de alguns elementos de máquinas que estão presentes no projeto da minimáquina-ferramenta. Subdividido em quatro subcapítulos: 3.2.4.1 motores eletromagnético, 3.2.4.2 fusos de esferas recirculantes, 3.2.4.3 guias lineares e patins de elementos recirculantes.

3.2.4.1 MOTORES ELETROMAGNÉTICO

Quanto ao tamanho inicial foi adotado padrão *NEMA*¹ 34 para os motores eletromagnéticos dos três eixos lineares conectados diretamente por meio de acoplamentos elásticos aos fusos de esferas recirculantes.

Sendo o foco deste trabalho o dimensionamento preliminar da estrutura de GS, os elementos e subsistemas lineares foram adotados baseados em máquinas de dimensões e características similares a proposta neste trabalho. Os dimensionamentos específicos serão realizados em pesquisas futuras, dando continuidade ao presente projeto.

O suporte de motor adotado não possui mancais integrados de sustentação do fuso de esferas recirculantes. O suporte do motor define a distância do centro do eixo a superfície de referência e influência diretamente nas dimensões dos mancais do fuso de esferas recirculantes e no volume mínimo entre guias e demais partes mecânicas.

Pela facilidade de encontrar o suporte do motor eletromagnético da fabricante SYK[®] (2022) como um produto comercial e acessível, foi adotado o modelo MBA20-F que possui dimensões que se adequam as dos mancais fixos modelo FKA20. A escolha por componentes comerciais evita o projeto e produção de componentes personalizados.

Adotou-se montagem do fuso de esfera recirculante com um mancal fixo e outro suportado por permitir dilatação linear do fuso montado sobre a estrutura de GS que possui menor coeficiente de dilatação linear. Como a temperatura do ambiente no qual a máquina será instalada pode variar quando ela não estiver em uso (ar-condicionado desligado) foi adotada essa configuração.

¹*National Electrical Manufacture Association (NEMA)* trabalha na padronização de componentes elétricos afim de promover a construção de componentes e produtos padronizados a fim de acelerar, economizar e garantir a segurança de produtos e serviços de todo o mundo.

O mancal fixo selecionado possui dois rolamentos de esferas de contato angular montados em X com ajuste de pré-carga. O mancal suportado possui rolamento rígido de esferas. Os modelos adotados são da SYK®.

Na Tabela 3.5 estão indicados os componentes adotados inicialmente para os sistemas de suporte de motores e fusos de esferas recirculantes.

Tabela 3.5 - Componentes iniciais de suporte de motores e fusos de esferas recirculantes.

Nome do componente	Fabricante	Número do modelo
Suporte do motor de passo	SYK®	MBA20-F
Mancal lado fixo	SYK®	FKA20
Mancal lado sustentado	SYK®	BF20

Esses componentes (Figura 3.7) são compatíveis com fusos de esferas recirculantes de 20 mm de diâmetro.

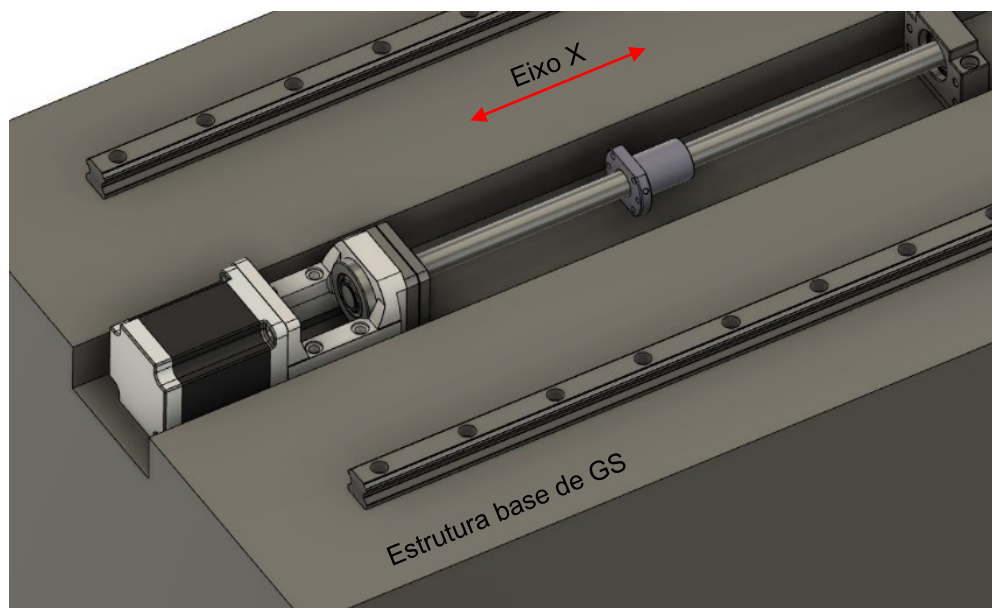
Figura 3.7 - Componentes utilizados na (a) fixação dos motores eletromagnéticos modelo MBA20 - F e dos fusos de esferas recirculantes (b) modelo FKA20 e (c) modelo BF20.



3.2.4.2 FUSOS DE ESFERAS RECIRCULANTES

De acordo com a SYK® (2022), para um motor *NEMA* 34 fusos de esferas recirculantes de diâmetro 20 mm devem ser empregados, sendo essa a dimensão inicialmente adotada. As demais características são diâmetro externo de 20 mm, passo de 10 mm, quatro circuitos de esferas, porca com flange, porca única, série Super S e carga pesada, modelo 20-10K4-FSC-L. As vistas em perspectiva isométrica da porca e fuso selecionados são apresentadas na Figura 3.8.

Figura 3.8 - Vista em perspectiva isométrica do motor *NEMA 34*, suporte do motor, mancais, fuso de esferas recirculantes e porca de esferas recirculantes.



Os comprimentos finais dos fusos de esferas recirculantes e a localização dos mancais foram definidos em etapas subsequentes em função dos requisitos de projeto geométricos e dimensionais.

3.2.4.3 GUIAS LINEARES E PATINS DE ELEMENTOS RECIRCULANTES

A fabricante HIWIN® (2020) sugere selecionar inicialmente guias lineares com patins de dimensões similares ao tamanho do fuso. Visando rigidez e durabilidade foram escolhidos patins de capacidades de carga superiores aos indicados com base nos fusos de esferas recirculantes selecionados.

Avaliando as faixas nominais ou volume de usinagem de projeto e dimensões padronizadas de guias indicadas no catálogo da HIWIN®, ao longo do projeto os comprimentos das guias variaram entre 720 mm e 1 000 mm, ambos tamanhos padronizados e fornecidos pela própria fabricante. No capítulo 3.4, que aborda o projeto preliminar, são detalhadas as decisões de projeto.

Na Tabela 3.6 são especificados os patins e guias de elementos recirculantes considerados nos dez protótipos desta pesquisa.

Tabela 3.6 - Relação de guias e patins considerados nos dez protótipos.

Item	Número de série	Tipo
1	HGL30HAZAP	Patins
2	HGH35HAZAP	Patins
3	HGW30HCZAP	Patins
4	HGR30R760P	Guia
5	HGR30R1000P	Guia
6	HGR35R1000P	Guia
7	RGW25CC	Patins
8	RGH30HA	Patins
9	RGW30HC	Patins
10	RGH35HA	Patins
11	RGR25R1000H	Guias
12	RGR30R1000P	Guias
13	RGR35R1000P	Guias

3.3 PROJETO PRELIMINAR

O projeto preliminar demandou dez ciclos de projeto, resultando em dez protótipos virtuais. Os protótipos foram aperfeiçoados concomitantemente com o amadurecimento do projeto, aprendizado do programa *CAD-CAE-CAM Fusion 360*[®], aplicação das restrições de projeto e aspectos geométricos da estrutura considerando acessos para montagem e facilidade de fabricação dos moldes e processo de conformação do GS e sua desmoldagem. Também se considerou critérios de acessibilidade para montagem, alinhamento e manutenção da máquina.

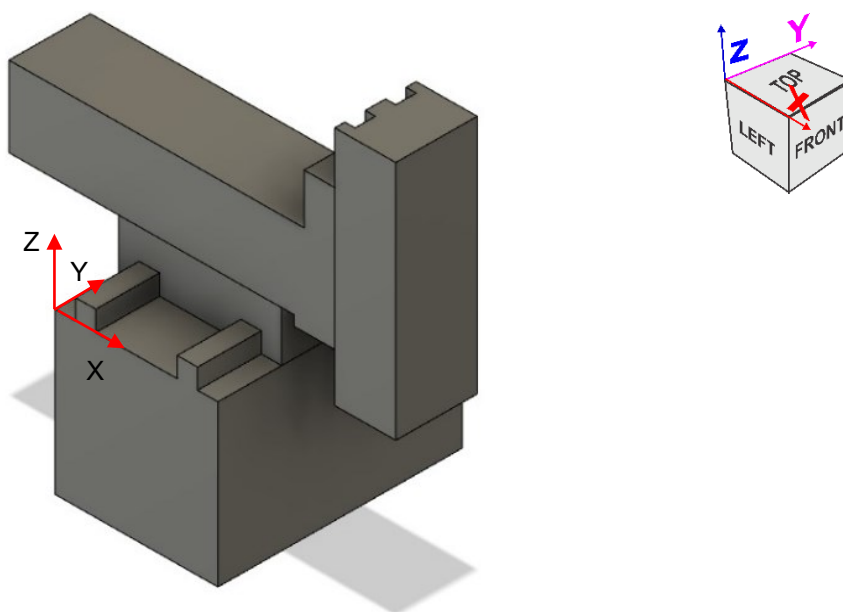
O projeto *CAD-CAE* foi totalmente desenvolvido no Fusion 360[®] da empresa Autodesk[®] com licença educacional e simulações em nuvem gratuitas.

Os dez protótipos são detalhados nos capítulos a seguir.

3.3.1 PROTÓTIPO 1

O primeiro esboço geométrico (Figura 3.9) proporcionou uma versão tridimensional da minimáquina-ferramenta baseada na geometria de referência da Kern Micro HD[®] e norteou o projeto evolutivo.

Figura 3.9 - Esboço em perspectiva isométrica do primeiro protótipo da minimáquina-ferramenta com sistema cartesiano baseado na Kern Micro HD®.



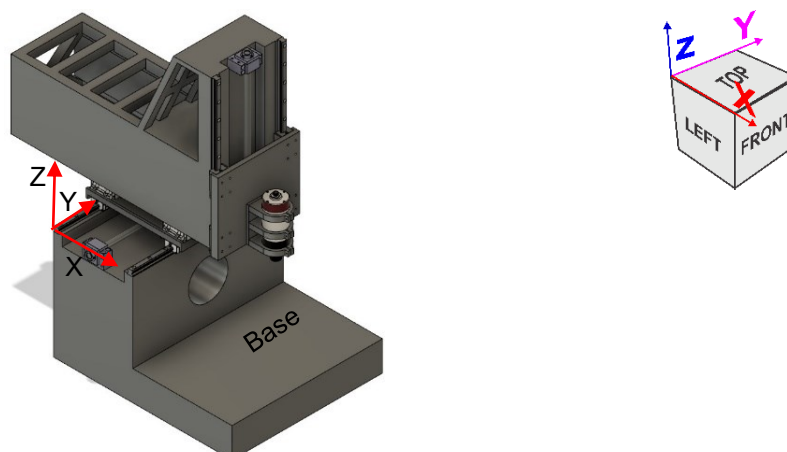
A origem do sistema de referência ficou localizada na face anterior da base da minimáquina-ferramenta no canto superior esquerdo, conforme representado (Figura 3.9). O sistema de referência do protótipo 1 foi o mesmo dos demais protótipos (1 a 10).

O protótipo 1 não integrou patins, guias lineares, fusos, mancais, suportes de motores, motores e SP. O objetivo foi aprender a modelar no Fusion 360® e aplicar as ferramentas de união de componentes com as restrições de movimento pertinentes a cada subconjunto linear.

3.3.2 PROTÓTIPO 2

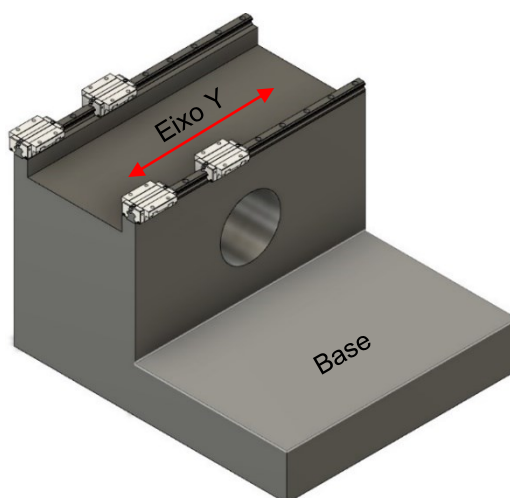
No protótipo 2 (Figura 3.10) foram adicionados guias lineares, fusos, mancais, SP, rebaxos e dimensões reais no desenho da minimáquina-ferramenta. Para efeitos de aprendizado de desenho CAD, também foram modeladas características geométricas encontradas na estrutura de referência, como reforços e nervuras, desconsiderando aspectos de viabilidade técnica de fabricação. No modelo de referência da Kern Micro HD®, as estruturas dos sistemas dos eixos X e Z são de liga de alumínio fundida e a base principal, que aloja os eixos Y, A e B, de GS.

Figura 3.10 - Esboço em perspectiva isométrica do protótipo 2 da minimáquina-ferramenta.



O protótipo 2 foi mais detalhado e considerou os subsistemas lineares adaptando as características da Kern Micro HD®. Na Figura 3.11, as guias e patins do eixo Y são mostradas sobre a estrutura base principal.

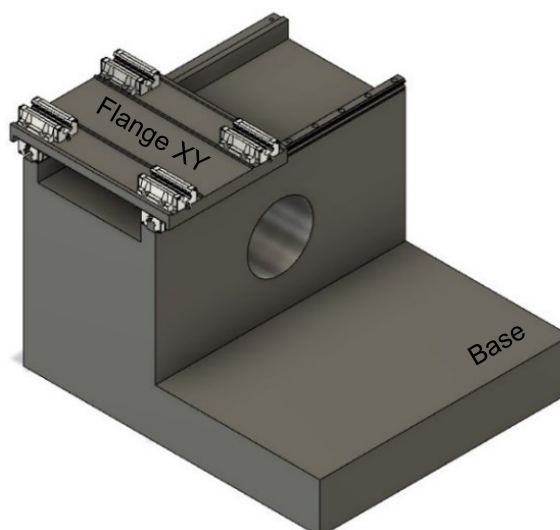
Figura 3.11 - Estrutura base do protótipo 2 da minimáquina-ferramenta com guias e patins do eixo Y em perspectiva isométrica.



A estrutura possui 760 mm de comprimento e 400 mm de largura. O furo na face vertical frontal de 200 mm de diâmetro foi adicionado visando futura atualização com a adição do quarto e quinto eixos (A e B de rotação), seguindo a proposta da Kern Micro HD®. As guias e patins foram dos modelos HGR760P e HGW30HCZAP, respectivamente.

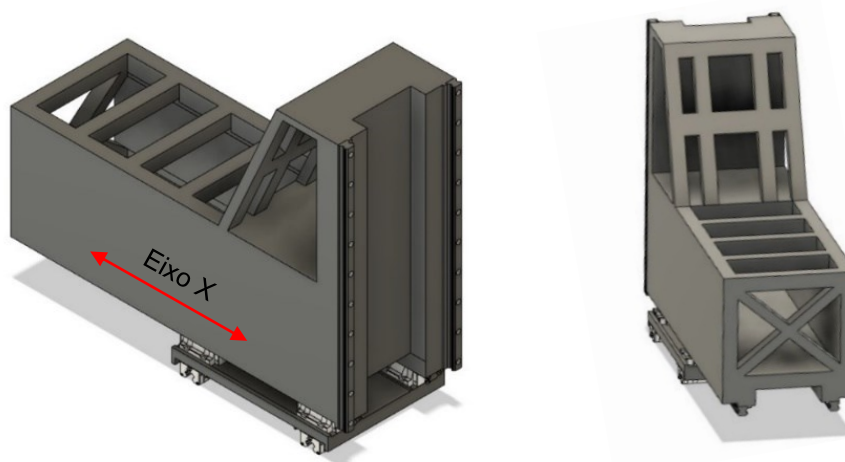
Logo após o modelamento da base, foi concebida a estrutura de interligação dos sistemas lineares dos eixos X e Y (Figura 3.12).

Figura 3.12 - Flange XY de interligação dos sistemas lineares dos eixos X e Y em perspectiva isométrica sobre a estrutura principal.



Foram respeitadas todas as sugestões para melhorar a rigidez na montagem das guias seguindo o catálogo do fabricante. O flange XY é responsável por conectar a estrutura do eixo X ao eixo Y (Figura 3.13). Os patins superiores do flange XY, que integram o sistema linear do eixo X, foram do modelo HGW30HCZAP.

Figura 3.13 - Detalhes construtivos da estrutura X.

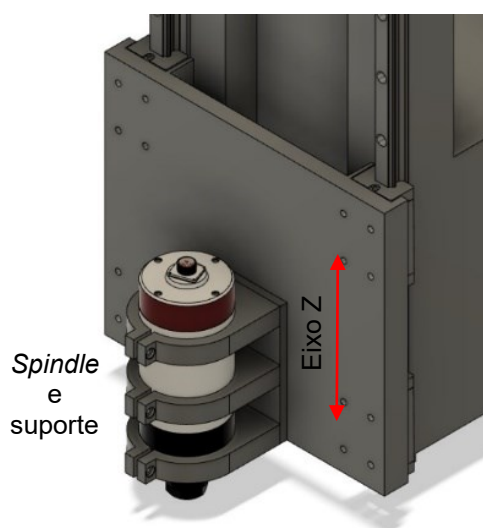


A estrutura X (Figura 3.13) foi projetada com reforços estruturais seguindo características da máquina-ferramenta Kern Micro HD[®]. Por mais interessante que o formato da estrutura X tenha ficado e considerando a redução de massa da estrutura,

dada a complexidade de fabricação em GS, essa geometria foi descartada nessa fase do projeto. Na Kern Micro HD®, segundo poucas informações disponíveis, a estrutura do conjunto X é de liga de alumínio fundida e usinada que viabilizam a geometria. Assim, dados em requisitos do presente projeto, não foi dada continuidade no detalhamento da geometria do conjunto X proposto no segundo protótipo.

A plataforma do eixo Z desloca-se ao longo de X em conjunto com o flange que sustenta o SP (Figura 3.14). Os modelos das guias dos sistemas X (horizontal) e Z (vertical) foram HGR760P.

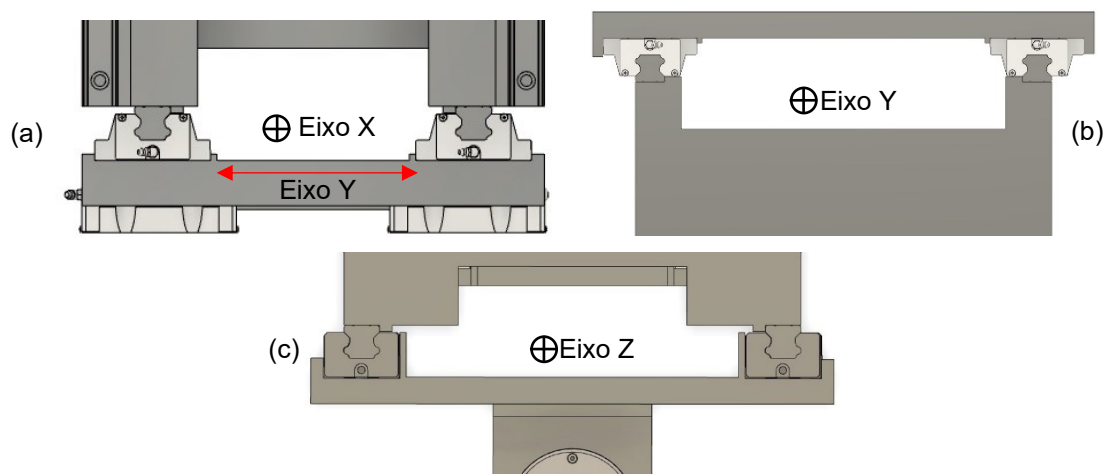
Figura 3.14 - Detalhe do *spindle* e sistema linear do eixo Z do segundo protótipo em perspectiva isométrica.



A plataforma do eixo Z foi concebida utilizando-se das orientações dos catálogos dos fabricantes de sistemas lineares para alcançar maior rigidez na montagem dos patins. Ela foi engastada nos patins de modelo HGL30HAZAP fixados nas guias verticais da estrutura X. O *spindle* modelo TLO-100-3.7-20 e seu suporte (acompanha o *spindle*, entretanto o modelo CAD não foi disponibilizado pelo fabricante) foram considerados nesta etapa. O suporte apresentado na Figura 3.14 foi desenhado com base nas imagens disponíveis na página do fornecedor.

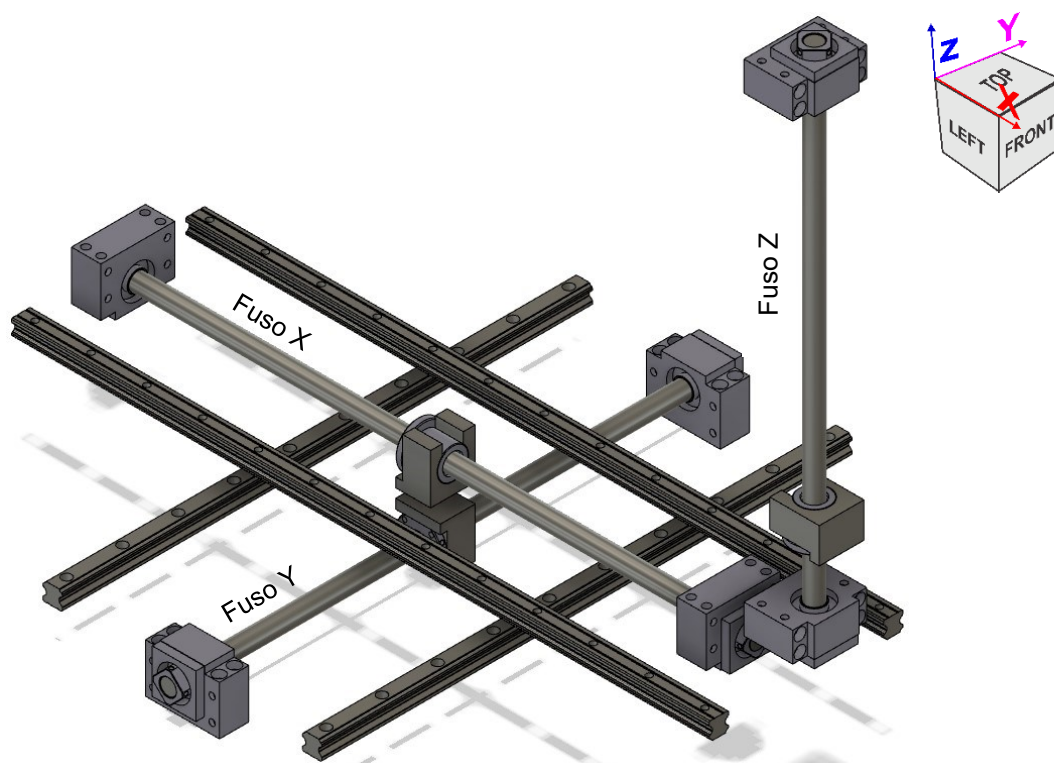
Cavidades foram criadas entre o flange XY e a estrutura principal, entre a estrutura X e o flange XY e entre a estrutura X e a estrutura Z visando alojar os suportes dos motores, motores, mancais, fusos de esferas recirculantes, porcas, suportes das porcas e acoplamentos elásticos (Figura 3.15).

Figura 3.15 - Espaços considerados para integração dos sistemas de potência dos eixos (a) X, (b) Y e (c) Z.



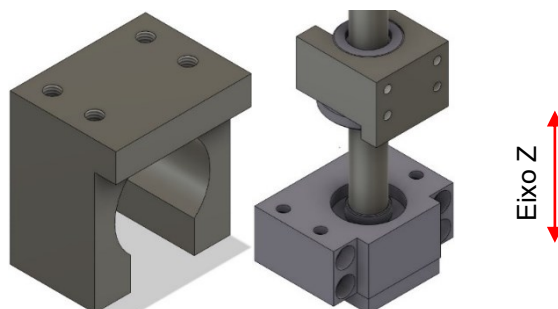
Nesses espaços foram considerados mancais do tipo fixo, modelo BK25, da marca HIWIN[®]. Fusos de esferas recirculantes e suas porcas de modelo 25-6K5-FSC-C foram considerados. Nessa etapa não foram adicionados os motores eletromagnéticos e seus suportes. A disposição espacial somente desses elementos é apresentada na Figura 3.16. A partir do protótipo 3 esses sistemas foram detalhados.

Figura 3.16 - Mancais, fusos de esferas recirculantes, porcas e suportes das porcas dos eixos (a) X, (b) Y e (c) Z em perspectiva isométrica do segundo protótipo.



O suporte das porcas é mostrado na Figura 3.17. Nessa fase do projeto não foram considerados material, elementos de fixação e desafio de fabricação, apenas aspectos de montagem dos suportes nas porcas sem que seja necessário desmontar os mancais dos fusos. Foi modelado suporte com canal para permitir o acesso do fuso e translação da porca com ajuste na cavidade do suporte na montagem.

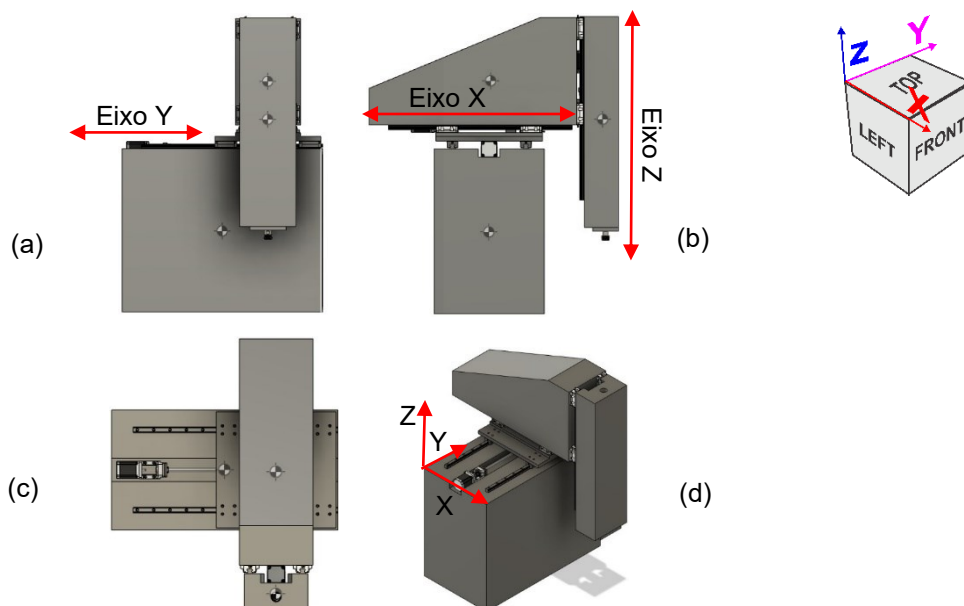
Figura 3.17 - Suporte das porcas dos fusos de esferas recirculantes em perspectiva isométrica.



3.3.3 PROTÓTIPO 3

Nessa fase do projeto foi levado em consideração a distribuição de massa da estrutura de GS e as posições do Centro de Gravidade (CG). As análises do CG e sua otimização foram feitas a partir do modelo base apresentado na Figura 3.18 e não foram consideradas as massas dos elementos de máquinas.

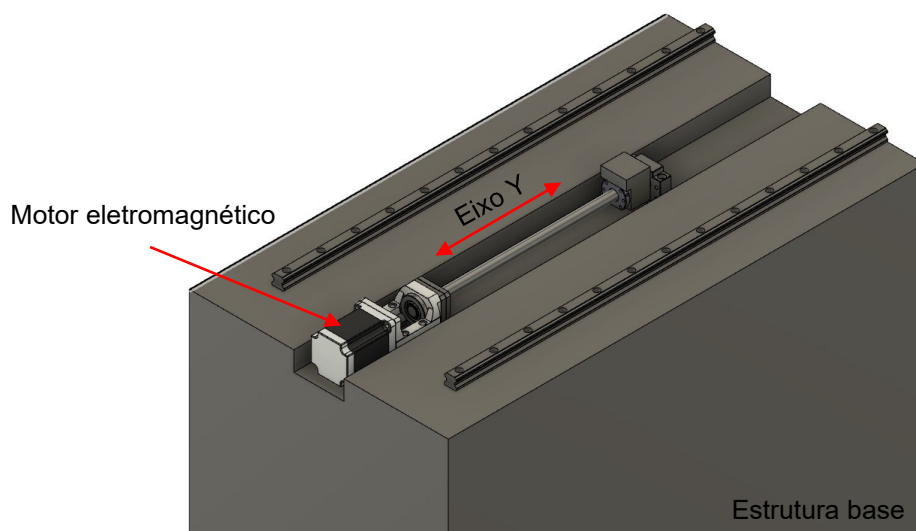
Figura 3.18 - Vista (a) frontal, (b) lateral esquerda, (c) superior e (d) perspectiva isométrica do terceiro protótipo da minimáquina-ferramenta.



Conforme mostrado na Figura 3.18, foram adicionados ao modelo os motores eletromagnéticos padrão *NEMA* 34 e seus respectivos suportes. Os mancais foram trocados para modelos FKA20 e BF20 da SYK® nos eixos X, Y e Z. O fuso, conforme discutido no subtópico 3.3.4.2 foi o modelo 20-10K4-FSC-L. A partir dessa etapa somente seu comprimento sofreu alteração ao longo dos protótipos subsequentes.

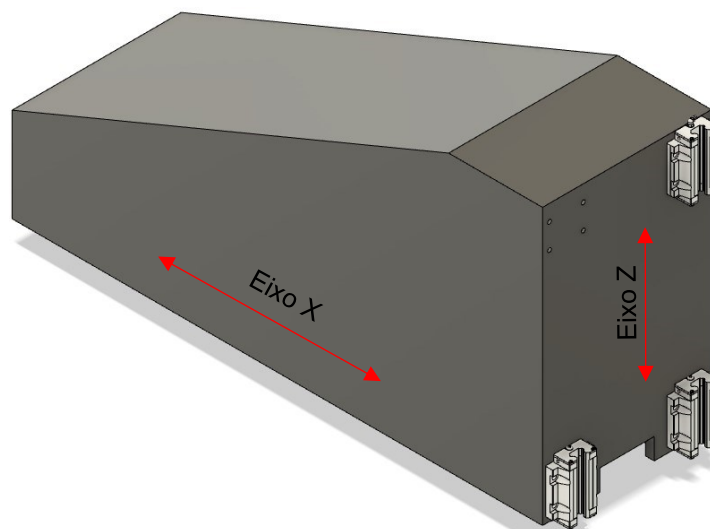
A estrutura base foi alargada em relação ao protótipo 2 e as guias foram reposicionadas afastadas das bordas laterais da estrutura base visando futuras flanges e ancoragem de insertos no GS para melhorar a rigidez estrutural. Foi aumentado o comprimento dela de forma que ficasse maior que o comprimento das guias, isso se deu para que o motor eletromagnético se posicionasse no interior da estrutura base e permanecesse protegido de elementos externos (Figura 3.19).

Figura 3.19 - Estrutura base do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta com guias, patins, mancais, fuso, porca, suporte da porca e motor eletromagnético do eixo Y em perspectiva isométrica.



Os guias lineares aumentaram de 760 mm para 1 000 mm de comprimento, adotando-se assim, o modelo de guia HGR30R1000P. A distância entre elas foi de 400 mm, alargando-se assim a estrutura base em 200 mm. Com essas modificações na intenção de garantir a faixa nominal determinada pela delimitação do projeto, subcapítulo 3.2.1, aumentou-se o comprimento da estrutura X de 1 010 mm para 1 130 mm (Figura 3.20).

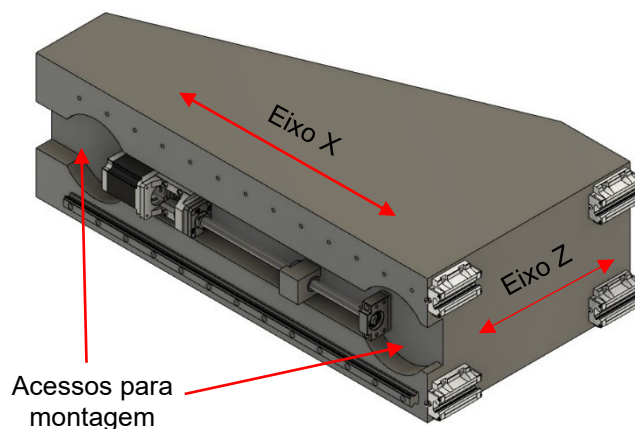
Figura 3.20 - Estrutura X do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta com patins do eixo Z em perspectiva isométrica. O patim superior esquerdo foi ocultado para mostrar as furações de montagem na estrutura.



Apesar do aumento do comprimento da estrutura X, as guias se mantiveram do tamanho e modelo das guias do protótipo 2. Adotou-se uma geometria mais simples para a estrutura X pensando na aplicação com GS. Os patins dos eixos X e Z foram mantidos iguais aos do protótipo 2.

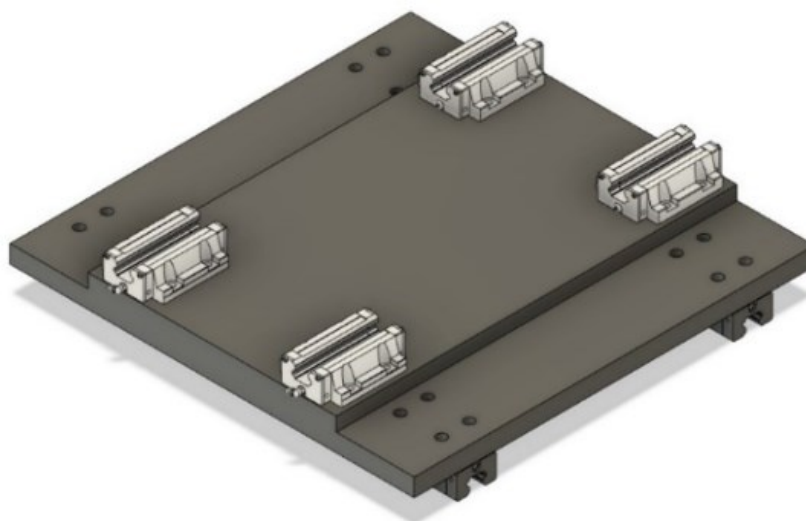
A partir dessa fase começou-se a considerar os acessos para a montagem dos patins. Foram adicionados, portanto, acessos na parte inferior da estrutura X (Figura 3.21).

Figura 3.21 Estrutura X do Protótipo 3 da minimáquina-ferramenta. Vista Inferior mostrando os mancais, fuso, porca, suporte da porca, suporte do motor, motor eletromagnético, guia, patins e acessos de montagem. Uma guia foi ocultada para apresentar os furos de montagem na estrutura.



Também foram considerados os furos de montagem das guias e patins na estrutura X (Figura 3.20 e Figura 3.21). Os acessos de montagem foram pensados de modo a serem construídos a partir de moldes de tubulações comerciais de *PVC* de 200 mm a fim de reduzir o custo e simplicidade do molde. Ao contrário do flange XY, a estrutura X não teve alteração em sua largura, permanecendo com 360 mm (Figura 3.22).

Figura 3.22 - Flange XY do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta com patins do eixo X na parte superior e patins do eixo Y abaixo do flange em perspectiva isométrica.

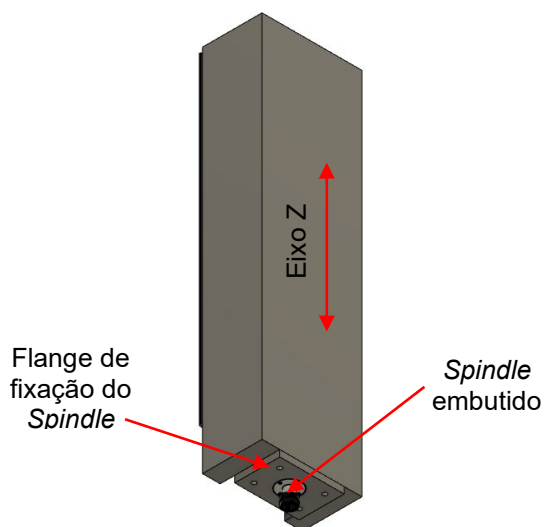


A largura do flange XY foi aumentada de 360 mm para 585 mm e seu comprimento de 482,1 mm para 580 mm. Foi adotado uma montagem mais simples sem considerar os parâmetros de maior rigidez, como feito no protótipo 2. Os patins responsáveis pela sustentação e movimentação da estrutura X não foram alterados. Houve alteração do modelo dos patins responsáveis pela movimentação do flange XY na direção Y, atualizado para HGL30HAZAP.

Ao contrário do protótipo 2, este considerou os parafusos de montagem dos patins. A posição dos patins do eixo X não foram alteradas em seu comprimento, porém a distância entre eles ao longo da direção X aumentou 96 mm. Criaram-se rebaixos de 20 mm e largura de 112,5 mm de ambos os lados do flange. Foram considerados furos escalonados para acomodar os parafusos de montagem dos patins inferiores.

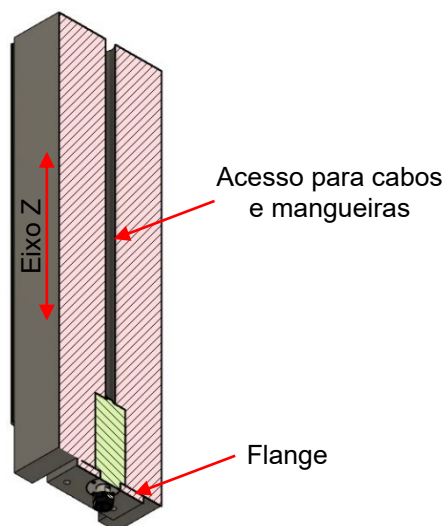
A estrutura do eixo Z ou estrutura Z também foi totalmente redesenhada (Figura 3.23).

Figura 3.23 - Estrutura Z do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta. Vista isométrica mostrando o *spindle* modelo TLO-100-3.7-20 R00 da TECMAF® (2022) embutido e o flange de fixação do *spindle* na estrutura Z.



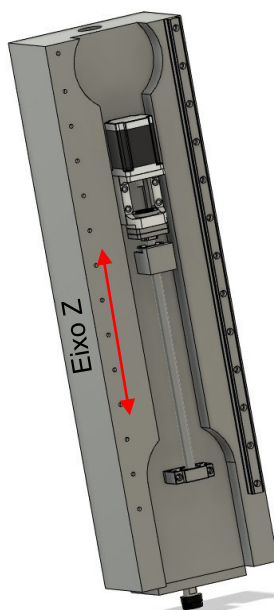
A nova estrutura Z ficou semelhante ao da máquina Kern Micro HD®. O SP foi embutido na estrutura Z e feito um flange de fixação externa. O comprimento total da estrutura Z ficou em 1 150 mm e as guias do eixo Z foram montadas nele. Ao longo do corpo foi adicionado um furo de 50 mm de diâmetro para a passagem dos cabos e mangueiras do SP (Figura 3.24).

Figura 3.24 - Estrutura Z do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta. Vista isométrica em corte mostrando o furo central de acesso ao *spindle* modelo TLO-100-3.7-20 R00 da TECMAF® (2022) e o flange de fixação do *spindle* na estrutura Z.



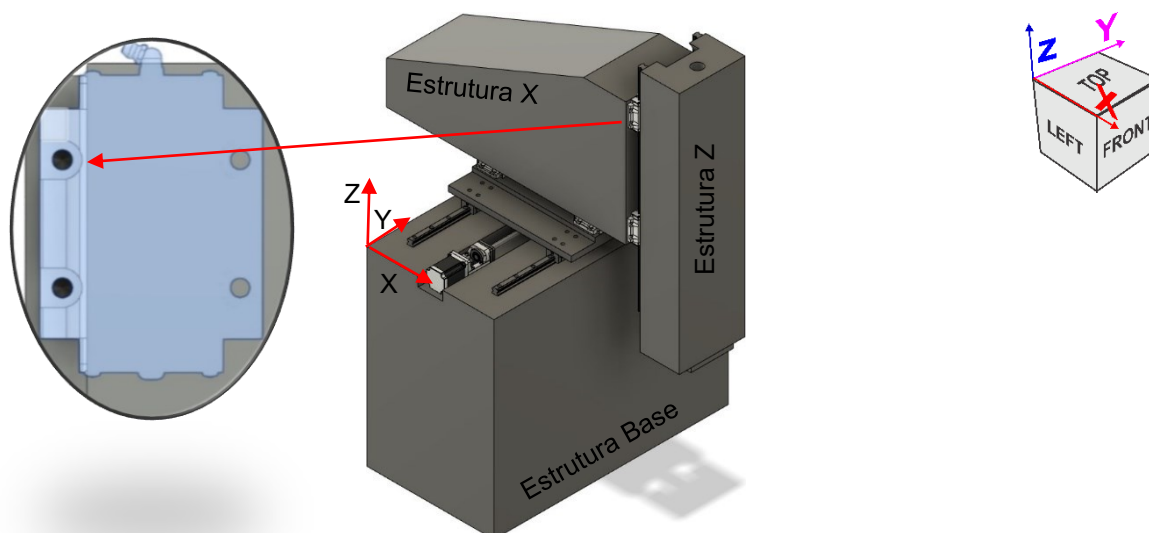
Assim como foram criados acessos de montagem de elementos importantes do SP e de montagem dos patins do flange XY na estrutura X (Figura 3.21), foram criados acessos de montagem dos patins da estrutura Z na estrutura X (Figura 3.25).

Figura 3.25 - Estrutura Z do Protótipo 3 da minimáquina-ferramenta com guia, fuso, porca, suporte da porca, motor eletromagnético, mancais, suporte do motor, cavidades de acesso e *spindle*. Uma guia foi ocultada para mostrar os furos de montagem.



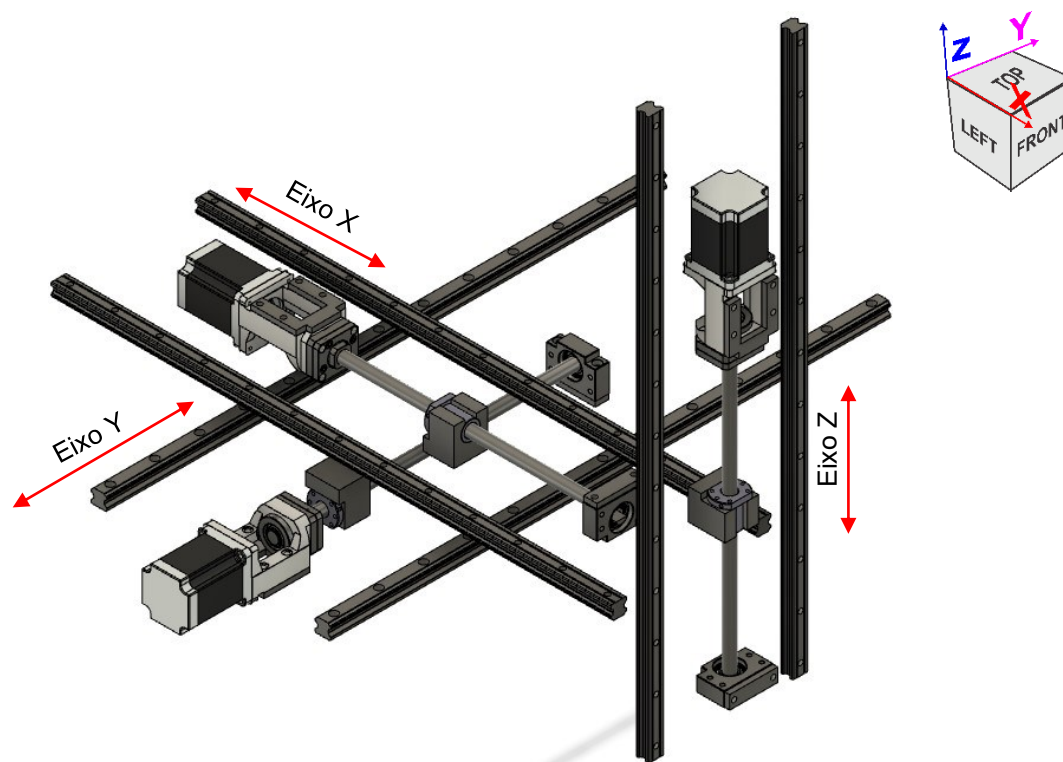
A estrutura Z ficou 50 mm mais estreita que a estrutura X, totalizando-se assim largura de 310 mm. Essa diferença de largura possibilitou criar um acesso para parafusar o lado externo dos patins na estrutura X (Figura 3.26).

Figura 3.26 - Vista superior em detalhe do acesso externo de montagem dos patins devido a diferença de largura entre as estruturas Z e X.



Os sistemas lineares completos dos três eixos ortogonais são apresentados na Figura 3.27.

Figura 3.27 - Mancais, fusos de esferas recirculantes, porcas e suportes das porcas dos eixos, guias, abraçadeiras das porcas, suportes dos motores e motores eletromagnéticos dos eixos X, Y e Z em perspectiva isométrica do terceiro protótipo.

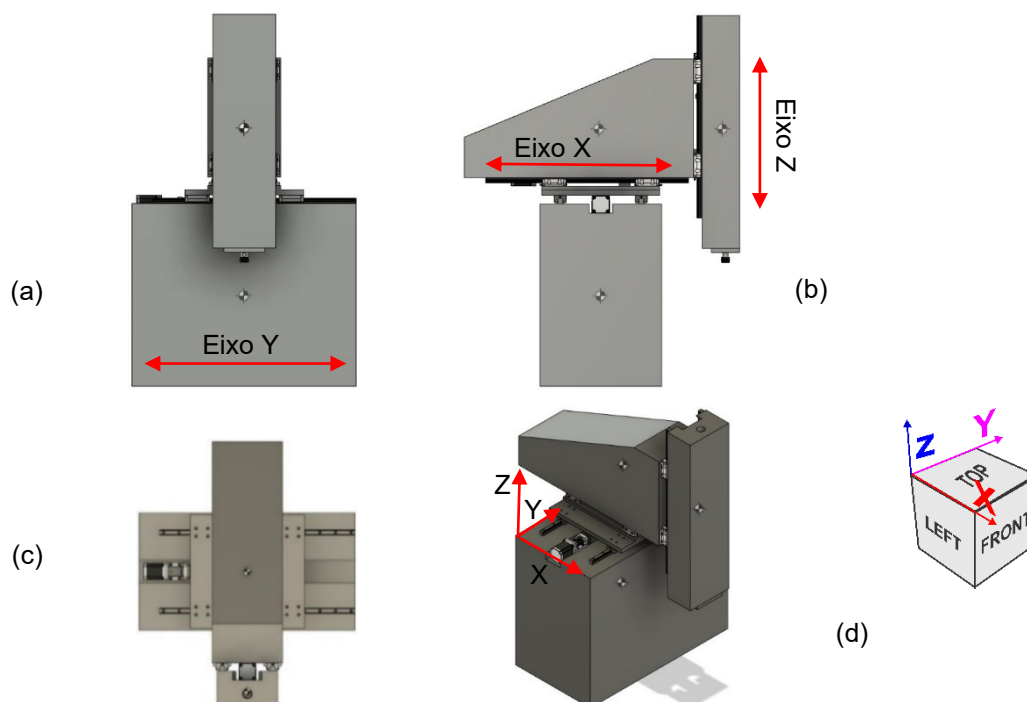


Nos protótipos seguintes foram realizadas somente pequenas alterações nesses sistemas, com destaque para os suportes das porcas dos fusos.

Na Figura 3.28 são mostradas as vistas do terceiro protótipo com destaque para a localização do CG alinhado com a estrutura base, garantindo assim menores momentos na estrutura.

As posições das estruturas mostradas na Figura 3.28 foram: estrutura X ficou avançada em aproximadamente 150 mm, a estrutura Z em 210 mm e para centralizar ambos o flange XY afastado 264 mm da origem do sistema de coordenadas no sentido positivo de X. O interesse do estudo das posições dos CG foi para reposicioná-los de forma a ficarem na linha de ação da força dos fusos de esferas recirculantes. Essa técnica traria uma diminuição no momento gerado pela aplicação da força dos fusos a uma certa distância do CG, melhorando desta forma a precisão da minímaquina-ferramenta.

Figura 3.28 - Vistas do Protótipo 3 da minimáquina-ferramenta no terceiro diedro. (a) frontal, (b) lateral esquerda, (c) superior e (d) isométrica.



A Tabela 3.7 contém a informação das distâncias dos CG para as linhas de ação dos fusos.

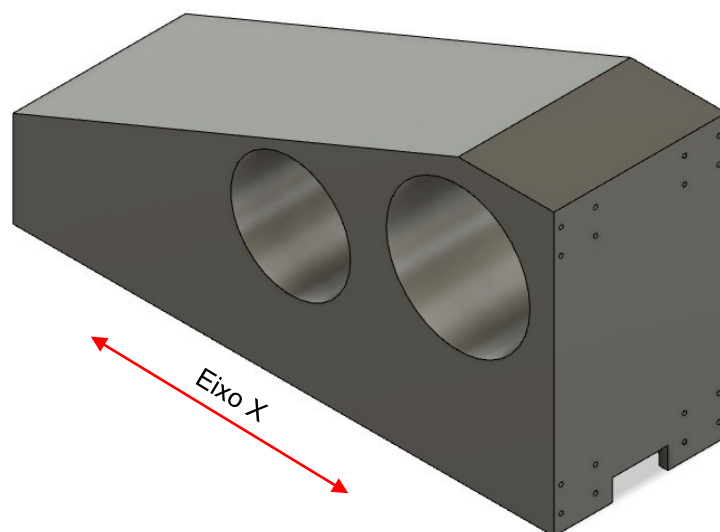
Tabela 3.7 - Distâncias em milímetros entre os CG das estruturas X e Z para as linhas de ação dos fusos.

Distância	Linha de ação dos fusos		
	Fuso X	Fuso Y	Fuso Z
CG da Estrutura X	228 mm	365 mm	Não se aplica
CG da estrutura Z	228 mm	365 mm	88 mm

A intenção ao manipular os CG das estruturas X e Z foi para que eles ficassem o mais próximo da linha de ação dos fusos de esferas recirculantes X e Y, provocando menores momentos na estrutura por haver um braço menor. Houve uma segunda intenção em manipular o CG da estrutura X para que ele fosse movido no sentido negativo do eixo X. A motivação era provocar menores distorções estáticas devido a massa em balanço quando a estrutura X avançasse no sentido positivo de seu eixo.

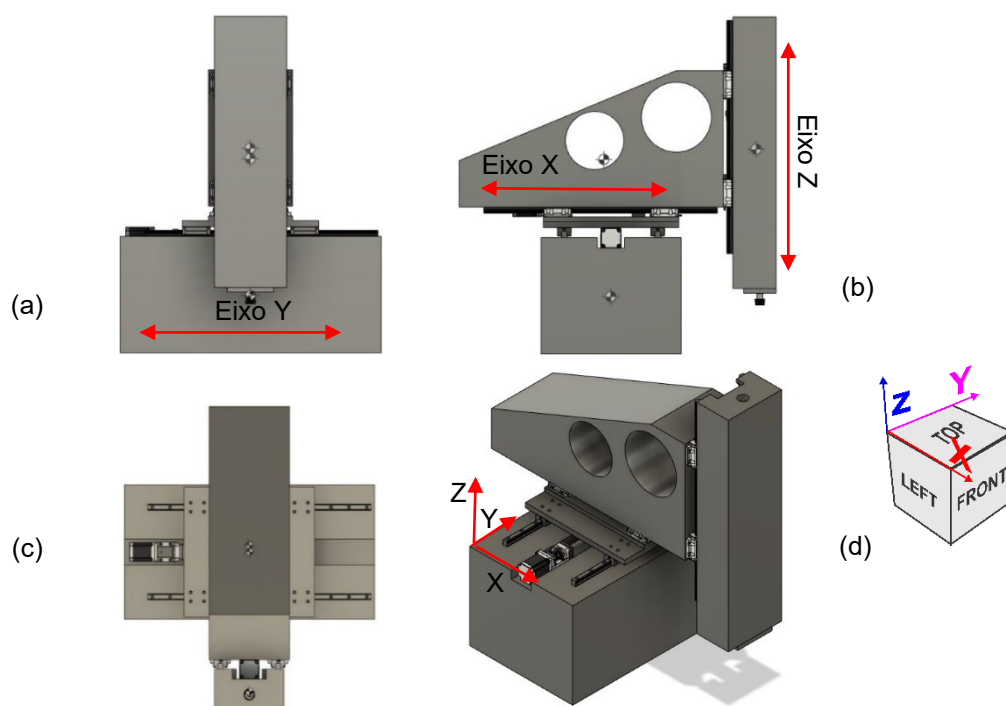
Nesse ponto começaram as modificações na estrutura X visando esses objetivos. A intenção era mover o CG 50 mm no sentido negativo do eixo X e levá-lo o máximo possível no sentido negativo do eixo Z. A primeira abordagem foi a criação de dois furos de diâmetros 300 mm e 250 mm na estrutura X (Figura 3.29).

Figura 3.29 - Estrutura X com a primeira otimização do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta em vista isométrica, furos adicionados para modificação do CG da estrutura.



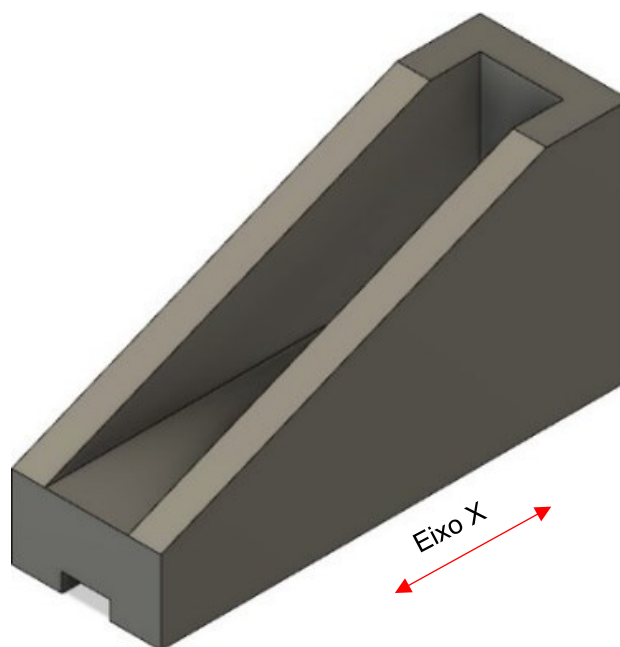
Os furos na estrutura X (Figura 3.29) foram inseridos o mais elevado possível na parte superior. A fim de quantificar as mudanças das posições do CG das estruturas Z e X (Figura 3.30), elas juntamente com o flange XY foram posicionados nas mesmas distâncias que as da Figura 3.28.

Figura 3.30 - Vistas do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta no terceiro diedro. (a) frontal, (b) lateral esquerda, (c) superior e (d) isométrica.



Com a modificação na estrutura X mostrada na Figura 3.29, seu CG foi alterado. A distância entre as linhas de ação das forças dos fusos X e Y e o CG diminuíram em 37,5 mm. Ao longo da direção X o CG foi movido 30 mm no sentido negativo, 60 % do valor desejável. O valor desejável seria ter o CG da estrutura base posicionado ao centro de seu comprimento, assim, haveria uma menor distorção estática conforme a estrutura X avançasse no sentido positivo de seu eixo. Notou-se que com esses ajustes poderia haver um potencial de maior precisão da minimáquina-ferramenta quando operada na faixa intermediária de sua faixa nominal. Outra modificação da estrutura X foi proposta e é apresentada na Figura 3.31.

Figura 3.31 - Vista isométrica da estrutura X otimizada do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta que contemplou em canal interno central na estrutura ao longo da direção X.



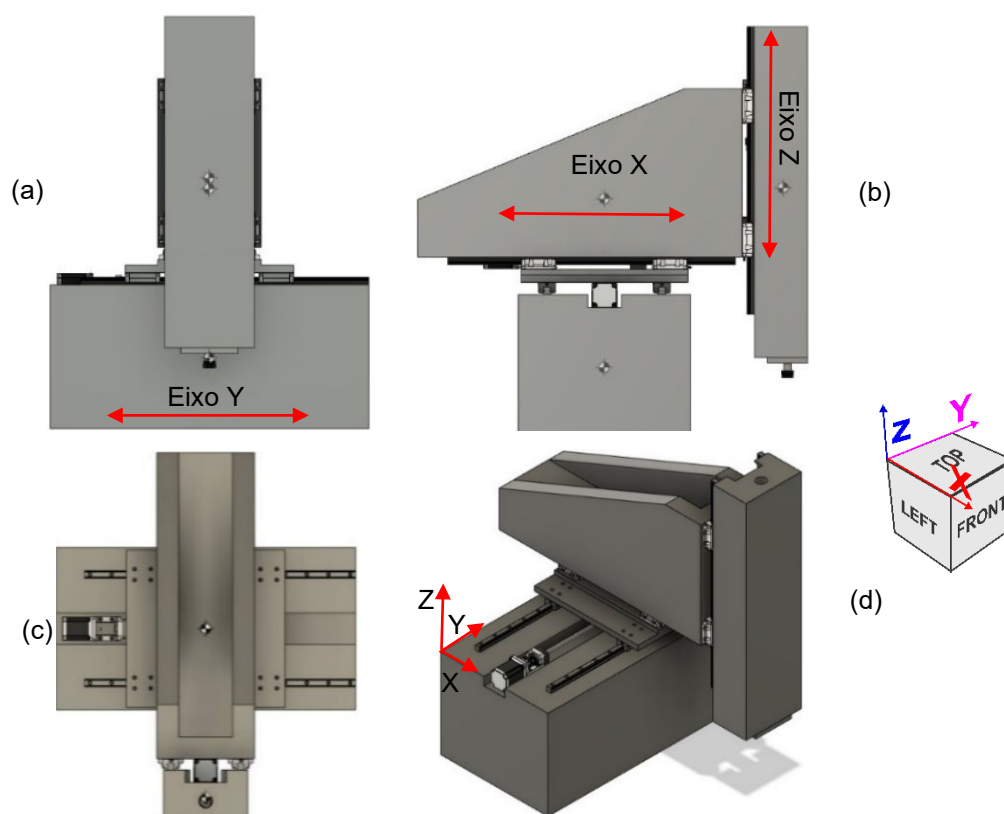
Ao invés de furos foi considerado um canal central na estrutura X, deixando paredes laterais e frontal de espessuras de 80 mm. Essa ação demandou reposicionamento da estrutura X, como pode ser observado na Figura 3.32.

Como o canal proporcionou remoção de massa uniforme, o CG não se alterou ao longo da direção X. Na direção de Z no sentido negativo o CG da estrutura X se moveu em 38 mm.

A estrutura Z não sofreu alteração de massa nessa etapa. Essa modificação aconteceu no protótipo 4.

A preferência por continuar estudando e otimizando a estrutura X com furos laterais (Figura 3.29) se deu pela facilidade construtiva dela, tanto do molde quanto da peça. A possibilidade de adequar as dimensões dos furos a tubos de *PVC* comerciais permitiu que a construção do molde da estrutura X fosse simplificada e seu custo de produção decrescido, devido a simplificação da forma.

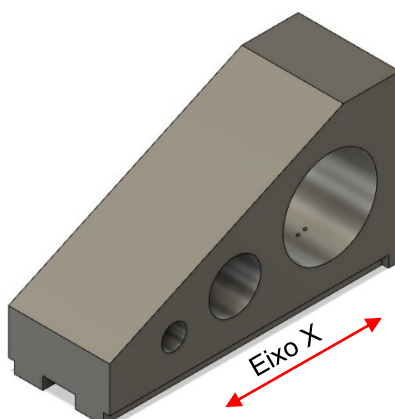
Figura 3.32 - Vistas do protótipo 3 da minimáquina-ferramenta no terceiro diedro. (a) frontal, (b) lateral esquerda, (c) superior e (d) isométrica.



3.3.4 PROTÓTIPO 4

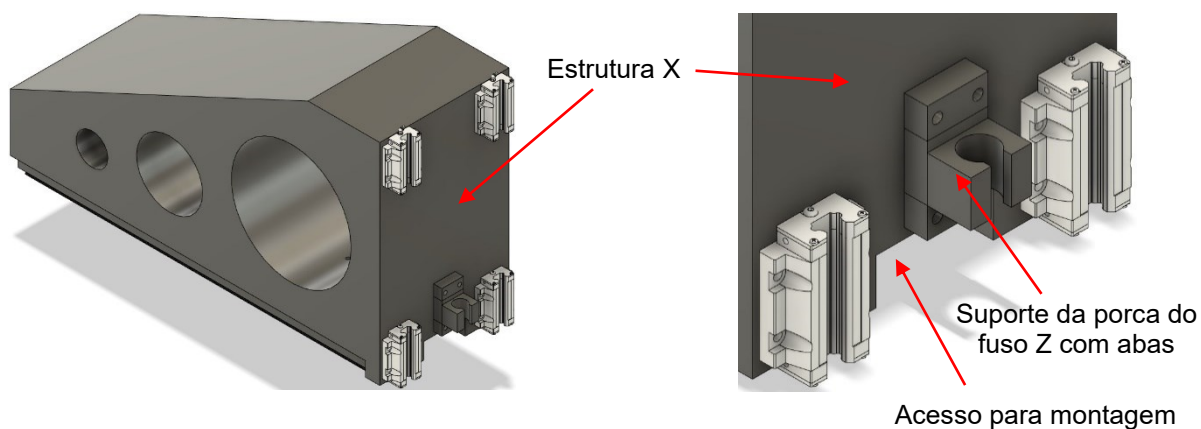
Nessa etapa foram avaliados os limites máximos de alívio de massa e seu efeito no posicionamento do CG de cada peça. A estrutura X (Figura 3.33) continuou sendo modelada com furos e, a partir deste protótipo, a ideia do canal central foi descartada na estrutura X.

Figura 3.33 - Estrutura X do protótipo 4 da minimáquina-ferramenta com furos de otimização, rebaixos e furos de acesso para montagem.



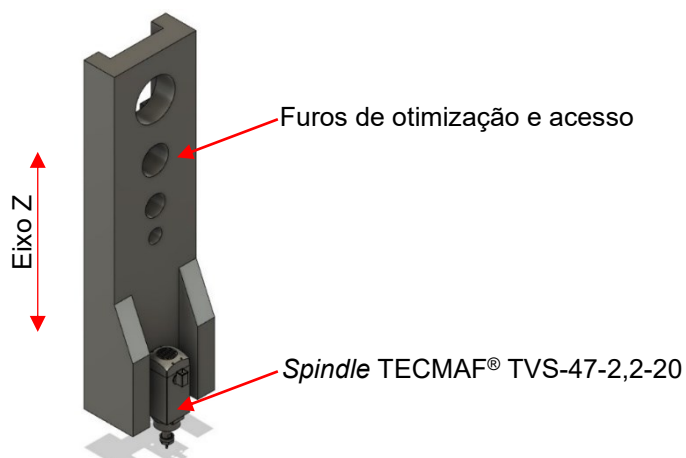
Os furos passantes nas laterais da estrutura X foram idealizados para deixar paredes de no mínimo 80 mm de espessura. Foram criados rebaixos nas laterais inferiores para facilitar o acesso aos parafusos de fixação externa dos patins. No furo lateral maior foram criados quatro furos de 10 mm para o acesso e montagem do suporte da porca do fuso X no flange XY. O acesso para montagem do suporte da porca do fuso X não demandou modificação na porca. O suporte da porca do fuso Z, entretanto, foi modificado criando-se abas de fixação (Figura 3.34).

Figura 3.34 - Novo suporte da porca do fuso Z do protótipo 4.



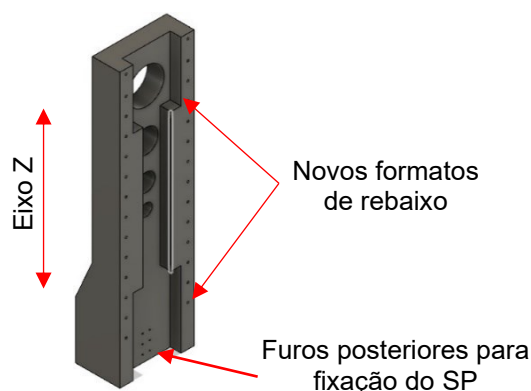
O novo suporte foi criado a partir do anterior com a adição de duas abas com dois furos em cada para fixação dela na estrutura X. O acesso aos furos e conseqüentemente a sua montagem e aperto dos parafusos foi feito através de furos na estrutura Z (Figura 3.35).

Figura 3.35 - Estrutura Z do protótipo 4 em perspectiva isométrica da minímáquina-ferramenta com furos de otimização e *spindle* da TECMAF® modelo TVS-47-2,2-20 montado externamente.



A estrutura Z teve sua espessura diminuída com a finalidade de reduzir sua massa total. Foram adicionados furos em sua face afim de modificar a posição do CG e criar acessos aos parafusos do suporte da porca do fuso Z. A fixação do SP foi concebida pela face posterior da estrutura Z (Figura 3.36).

Figura 3.36 - Face posterior da nova estrutura Z do Protótipo 4 em perspectiva isométrica.



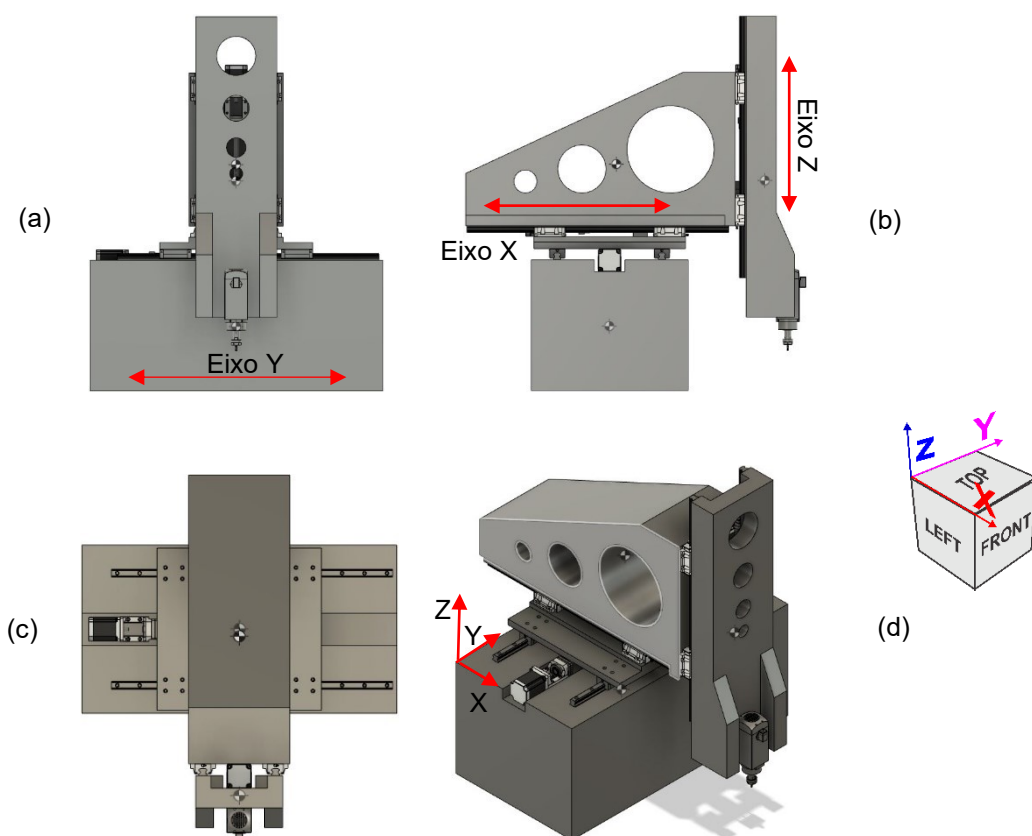
Os rebaixos que servem de acesso a montagem dos patins foram alterados, passando de cilindros de 200 mm de diâmetro para paralelepípedos de 200 mm de largura. Na estrutura X essa alteração não ocorreu, assim como o flange XY e a estrutura base se mantiveram iguais às do protótipo 3. Com essas modificações os CG das estruturas X e Z foram alterados (Figura 3.37).

Com relação ao projeto base do protótipo 3 o CG da estrutura X ficou 5 mm mais próximo dos fusos X e Y. O CG da estrutura X foi deslocado 26 mm no sentido positivo do eixo X. Apesar das maiores remoções de massa realizadas por meio da adição de furos maiores na estrutura X, o efeito de realocação do CG da estrutura X não atendeu as expectativas. Seu deslocamento no sentido negativo do eixo Z foi reduzido,

diminuindo a distância do CG da estrutura X ao fuso X em 5 mm. A posição horizontal do CG da estrutura X piorou, deslocando-se 64 mm no sentido positivo de X. O objetivo era o deslocamento do CG no sentido oposto.

O CG da estrutura Z se aproximou da linha de ação da força do fuso Z em 18 mm, ficando assim a uma distância de 60 mm do fuso Z. Na direção Z o CG da estrutura Z foi reposicionado 87,5 mm abaixo da antiga posição no protótipo 3. Apesar das mudanças positivas no CG notou-se que as espessuras das paredes foram drasticamente reduzidas e comprometeram o desempenho estrutural. Dessa forma, o projeto do protótipo 4 foi evoluído para o protótipo 5.

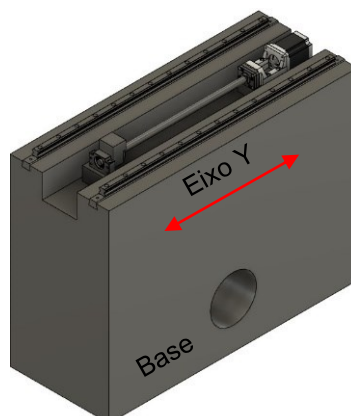
Figura 3.37 - Vistas do protótipo 4 da minimáquina-ferramenta no terceiro diedro. (a) frontal, (b) lateral esquerda, (c) superior e (d) isométrica.



3.3.5 PROTÓTIPO 5

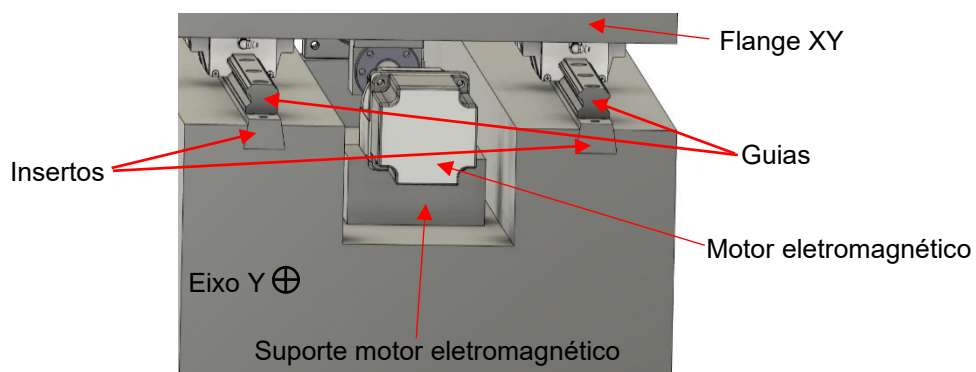
A estrutura base do protótipo 5 (Figura 3.38) passou por modificações expressivas comparada ao protótipo 4.

Figura 3.38 - Estrutura base do protótipo 5 da minimáquina-ferramenta com sistema linear parcial do eixo Y em perspectiva isométrica.



A base da estrutura teve o comprimento reduzido de 40 mm, ficando com 1 080 mm. A largura passou a ser de 430 mm (redução de aproximadamente 28 %). O canal central que aloja os mancais, motor, suporte de motor e fuso foi alargado para 150 mm. A altura total do vão também passou a ser 150 mm (distância entre a base e o flange XY). O aumento da seção transversal do canal (Figura 3.39) teve por objetivo propiciar espaço para alojar futuramente motor linear eletromagnético. Os demais eixos também foram dotados dessa característica.

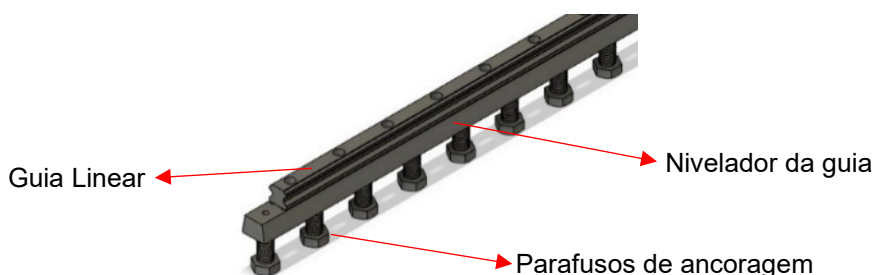
Figura 3.39 - Estrutura base do protótipo 5 da minimáquina-ferramenta em vista ampliada para mostrar os detalhes de montagem dos insertos, suportes de mancais, guias, patins, motor eletromagnético, fuso, porca e suporte da porca.



Com o aumento do vão foi necessário introduzir espaçadores entre a base e suporte do motor e dos mancais.

Insertos de aço foram introduzidos no GS nesta etapa objetivando criar as superfícies funcionais entre guias e estrutura (Figura 3.40). Os insertos foram projetados com uma seção transversal trapezoidal, no qual a base maior fica voltada para o interior da estrutura proporcionando engastamento. Através de parafusos de ancoragem M20, sextavado, com comprimento de 40 mm e classe 12,9; foi realizado a ancoragem do inserto na estrutura. Criou-se pares de furos passantes roscados com diâmetro de 5 mm ao longo do corpo do inserto, permitindo o nivelamento da guia através de parafusos M5 Allen sem cabeça. A base de referência dos insertos foi posicionada 5 mm acima da superfície do GS visando sobre material para posterior correção de tolerâncias dimensionais e geométricas. Todo nivelamento e fixação da guia foi pensado em ser feito antes do vazamento do material GS nas estruturas.

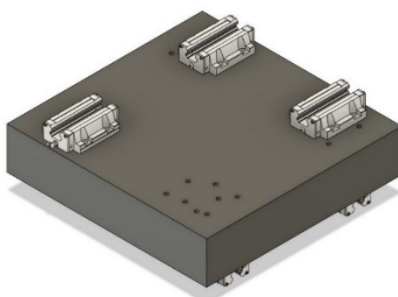
Figura 3.40 - Conjunto montado de insertos (parafusos), nivelador da guia e guia.



Foi considerado criar um gabarito de montagem das guias nos moldes para garantir alinhamento durante o vazamento e cura do GS. Essa solução foi adotada para todas os eixos lineares.

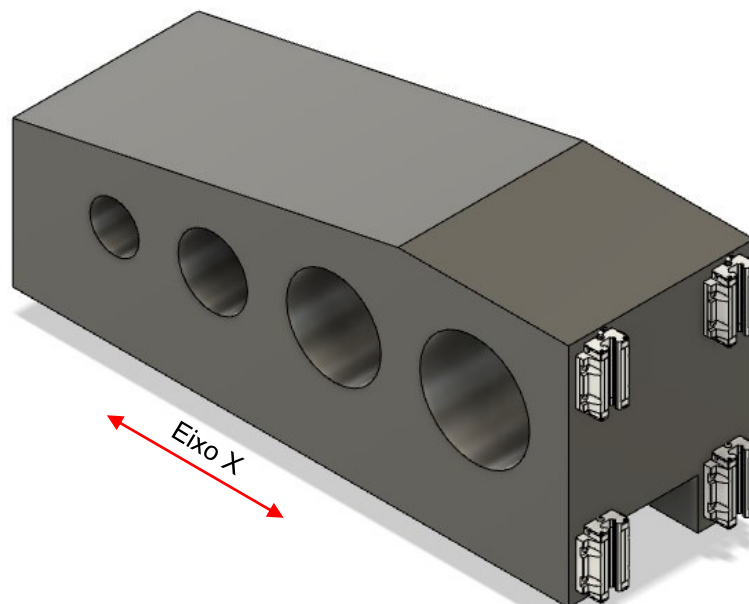
Foram feitas modificações significativas no flange XY (Figura 3.41).

Figura 3.41 - Flange XY do protótipo 5 da minimáquina-ferramenta com patins superiores do eixo X e furos otimizados para montagem dos patins em perspectiva isométrica.



A primeira modificação foi a remoção dos rebaixos laterais e o reposicionamento dos patins inferiores para debaixo dos patins superiores, evitando assim momentos causados pela defasagem dos apoios. A altura do flange XY foi aumentada de 46 mm para 100 mm. Sua largura diminuiu de 580 mm para 465 mm e comprimento diminuiu de 585 mm para 475 mm. Os patins inferiores foram alterados para o modelo HGW30HCZAP. Os furos de montagem dos patins foram reposicionados. O flange foi concebido para ser fabricado em GS. Os pares de patins de uma mesma guia foram distanciados em 200 mm, implicando na redução da altura da estrutura X (Figura 3.42).

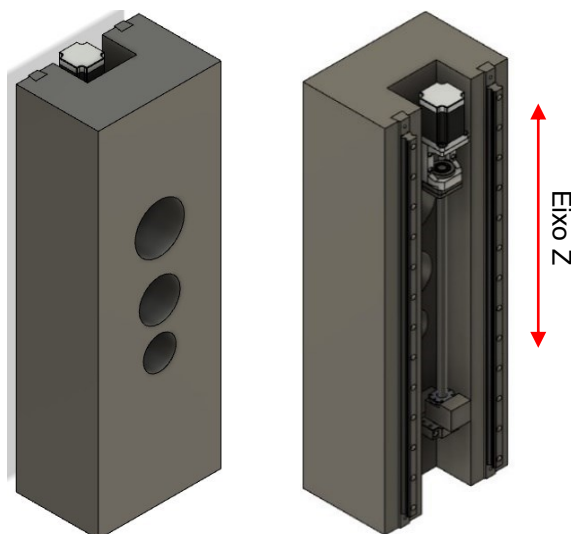
Figura 3.42 - Estrutura X do protótipo 5 da minimáquina-ferramenta com patins do eixo Z e furos laterais de otimização de diâmetros menores do que os dos protótipos anteriores em perspectiva isométrica.



A nova altura da estrutura X foi de 465 mm, 121 mm menor que o protótipo anterior. O comprimento foi aumentado em 110 mm, totalizando 1 140 mm. A largura foi aumentada de 20 mm, totalizando 380 mm.

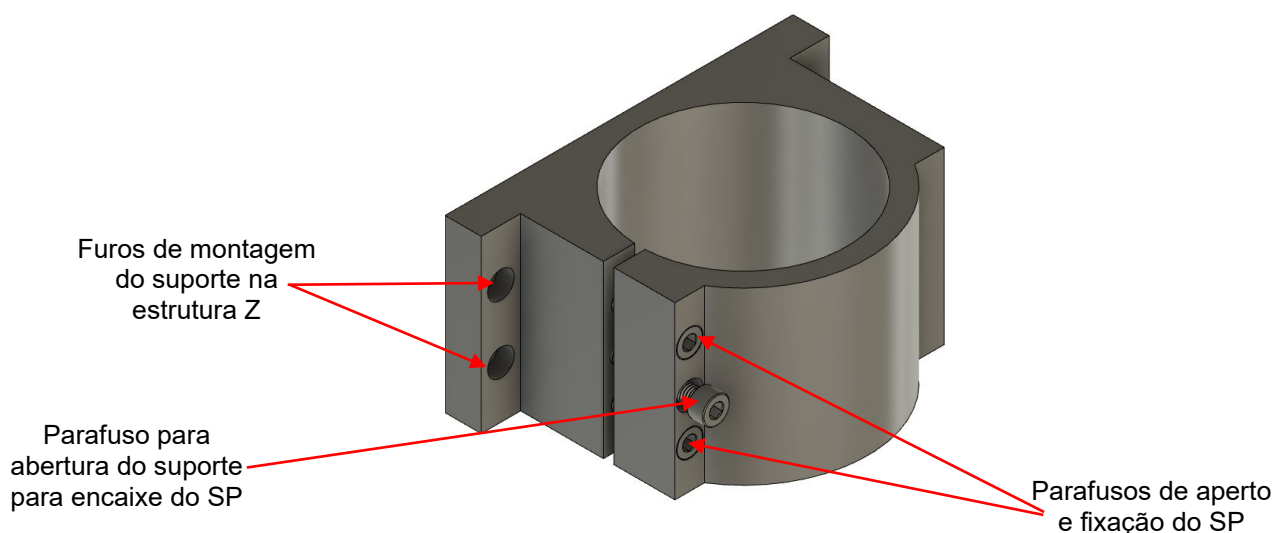
Nessa etapa os quatro furos laterais da estrutura X foram atualizados baseados em dimensões de tubos de *PVC* comerciais. Foram removidos todos os acessos criados até então. A estrutura Z (Figura 3.43) também sofreu atualizações.

Figura 3.43 - Estrutura Z do protótipo 5 da minimáquina-ferramenta com furos de otimização, guias, motor eletromagnético, suporte do motor, mancais, fusos, suporte da porca e porca em perspectiva isométrica.



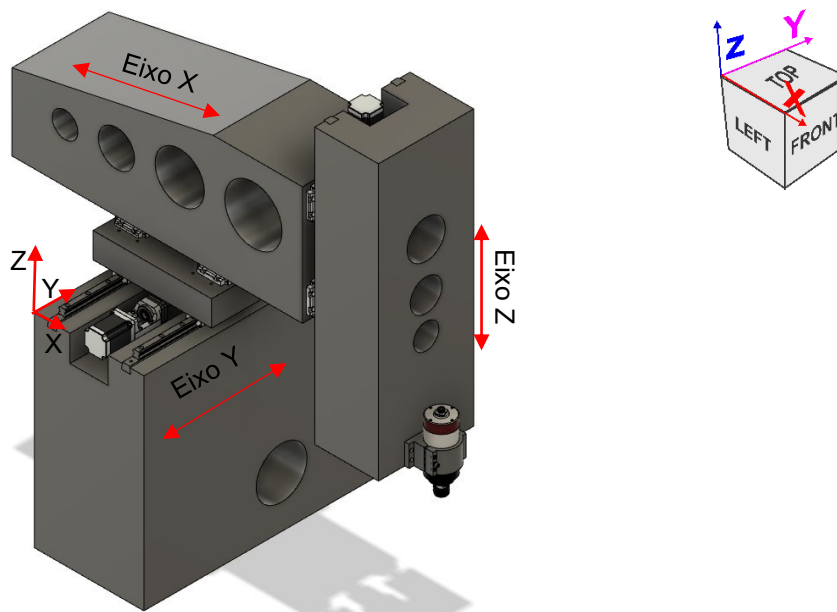
O formato geral da estrutura Z voltou a ser parecido com o do protótipo 3. Seu comprimento diminuiu em 70 mm, ficando com 1 080 mm. Os furos na face foram reduzidos para três com dimensões de tubos de *PVC* comerciais. Foi adicionado o suporte para o SP (Figura 3.44), modelo TLO-100-3.7-20, distribuído pela TECMAF® (2022). O suporte é fornecido sem furos nas abas laterais.

Figura 3.44 - Suporte para *spindle* Tecmat® modelo TLO-100-3.7-20 em perspectiva isométrica.



O modelo do SP e seu suporte foram os mesmos para os protótipos subsequentes. O esboço do protótipo 5 é apresentado na Figura 3.45.

Figura 3.45 - Esboço do protótipo 5 da minímáquina-ferramenta em perspectiva isométrica.

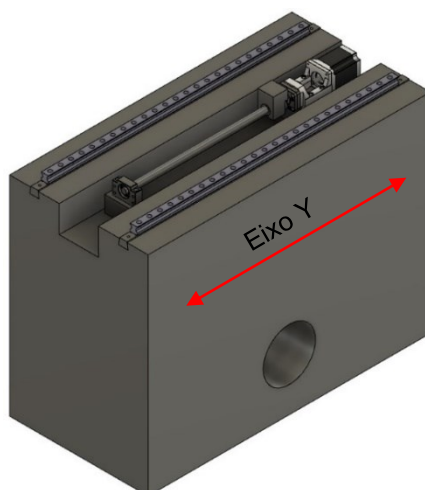


A partir do protótipo 5 os principais conceitos, geometrias e dimensões foram estabelecidos. Os protótipos subsequentes foram necessários principalmente para atender requisitos de fabricação, montagem e manutenção.

3.3.6 PROTÓTIPO 6

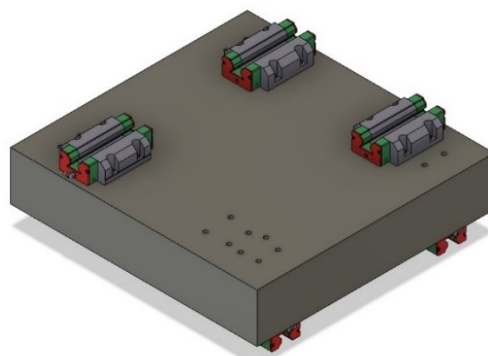
A estrutura base sofreu modificação na largura e as guias de esferas recirculantes foram substituídas por guias de rolos cilíndricos recirculantes modelo RGR30R1000P (Figura 3.46) para aumentar a rigidez e a capacidade de carga.

Figura 3.46 - Estrutura base do protótipo 6 da minímáquina-ferramenta com guias de rolos recirculantes, fuso, suporte da porca, porca, espaçadores, mancais, suporte de motor e motor eletromagnético em perspectiva isométrica.



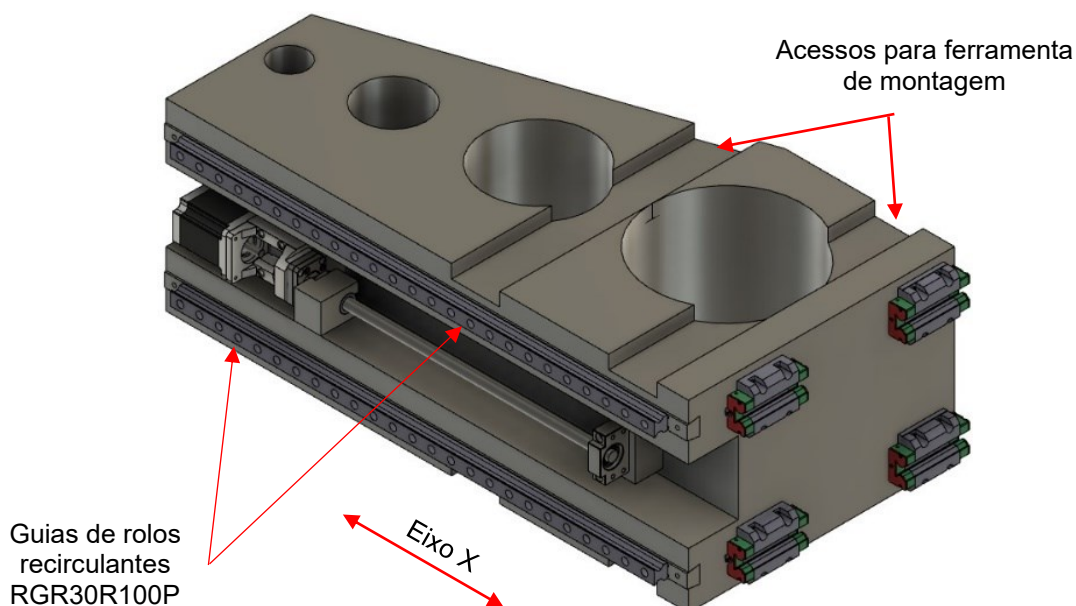
A largura da estrutura base aumentou de 430 mm para 530 mm resultando no aumento do flange XY (Figura 3.47).

Figura 3.47 - Flange XY do protótipo 6 da minimáquina-ferramenta com patins de rolos recirculantes em perspectiva isométrica.



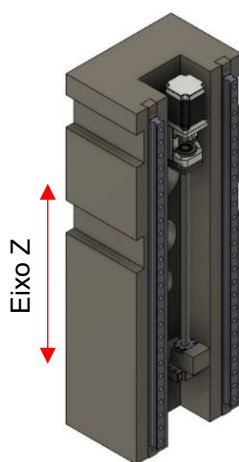
A largura da mesa aumentou em 20 mm, resultando em 485 mm. O comprimento aumentou em 10 mm, totalizando 485 mm. Os patins inferiores passaram a ser do modelo RGH30HAZAP e os superiores o modelo RGW30HCZAP. As furações responsáveis para a montagem dos patins foram dispostas de modo a ficarem com no mínimo uma distância de 20 mm. Com a mudança de todos os patins as guias também foram substituídas. O modelo de guia da estrutura X (Figura 3.48) adotado foi o RGR30R1000P, o mesmo da estrutura base (Figura 3.46).

Figura 3.48 - Estrutura X do protótipo 6 da minimáquina-ferramenta com furos de otimização, acessos de montagem, motor eletromagnético, suporte do motor eletromagnético, fuso, porca, abraçadeira da porca, mancais, espaçadores, guias do eixo Y e patins do eixo Z em perspectiva isométrica.



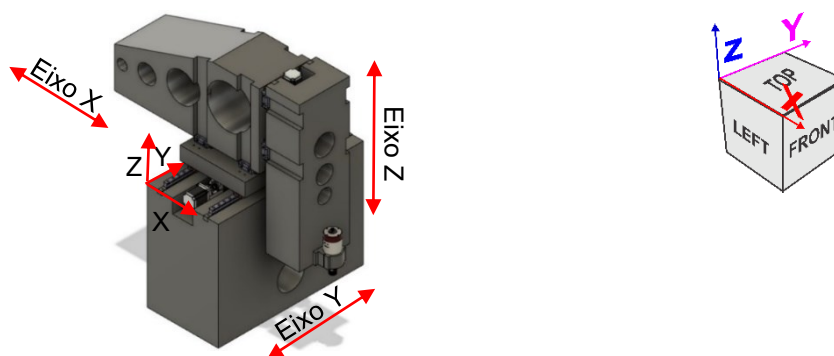
A única dimensão alterada na estrutura X foi a sua altura, que passou a ser de 530 mm. Foram criados rebaixos/aceessos nas laterais externas, para alinhamento de ferramenta de aperto dos parafusos externos, com dimensões de 100 mm de largura e 28 mm de profundidade. Os patins de sustentação e movimento da estrutura Z (Figura 3.49) foram atualizados para o mesmo modelo dos patins superiores do flange XY.

Figura 3.49 - Estrutura Z do protótipo 6 da minimáquina-ferramenta com furos de otimização, acessos de montagem, motor eletromagnético, suporte do motor eletromagnético, fuso, porca, abraçadeira da porca, mancais, espaçadores e guias do eixo Z, em perspectiva isométrica.



Foram adicionados também acessos laterais na estrutura Z com as mesmas dimensões dos acessos da estrutura X com propósitos iguais. Os afastamentos entre os acessos foram iguais aos afastamentos dos respectivos patins. As guias escolhidas foram de mesmo modelo da estrutura base e estrutura X. O alinhamento de montagem foi alcançado transladando as estruturas Z e X (Figura 3.50), permitindo acessar os parafusos de fixação.

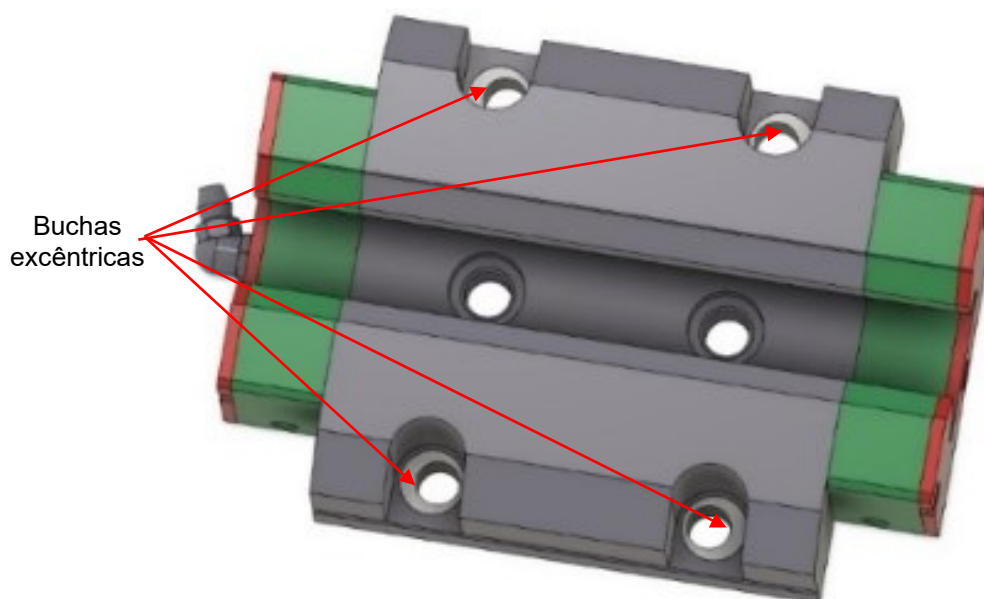
Figura 3.50 - Esboço do protótipo 6 da minimáquina-ferramenta em vista isométrica.



3.3.7 PROTÓTIPO 7

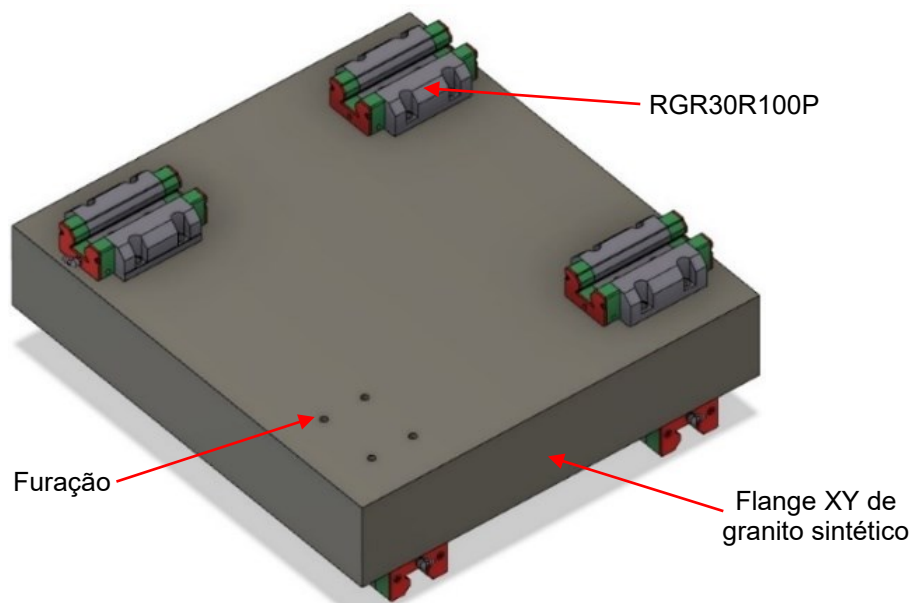
Foi realizada uma tentativa de configuração na qual os patins superiores e inferiores do flange XY ficassem com seus furos alinhados para fixação simultânea por único acesso de montagem. O objetivo era usar um único conjunto de quatro parafusos para fixar os patins superiores e inferiores. Foi considerada a operação de furação para alargamento dos furos e a inserção de buchas com furo central descentralizado para promover o alinhamento entre os patins dos eixos X e Y (Figura 3.51). Nos próximos protótipos a ideia foi descartada devido a necessidade de modificar a furação dos patins superiores, uma vez que não foram identificados modelos de patins com o mesmo padrão de furação que atendessem as demandas dos sistemas lineares dos eixos X e Y.

Figura 3.51 - Patim modificado com buchas com furo central descentralizado para alinhamento e montagem dos patins dos eixos X e Y em vista isométrica.



O furo no patim superior foi aumentado de 8 mm para 12 mm e inserida uma bucha excêntrica para readequar as distâncias entre furos, ficando assim coaxiais com os furos dos patins inferiores. Essa modificação demandaria patins inferiores maiores (modelo RG35HAZAP), unicamente selecionados para esse propósito. O flange XY (Figura 3.52) não foi modificado em dimensões, apenas no padrão de furação de montagem dos patins.

Figura 3.52 - Flange XY do protótipo 7 da minimáquina-ferramenta com patins do eixo X na face superior e furo de montagem coincidente, em vista isométrica.

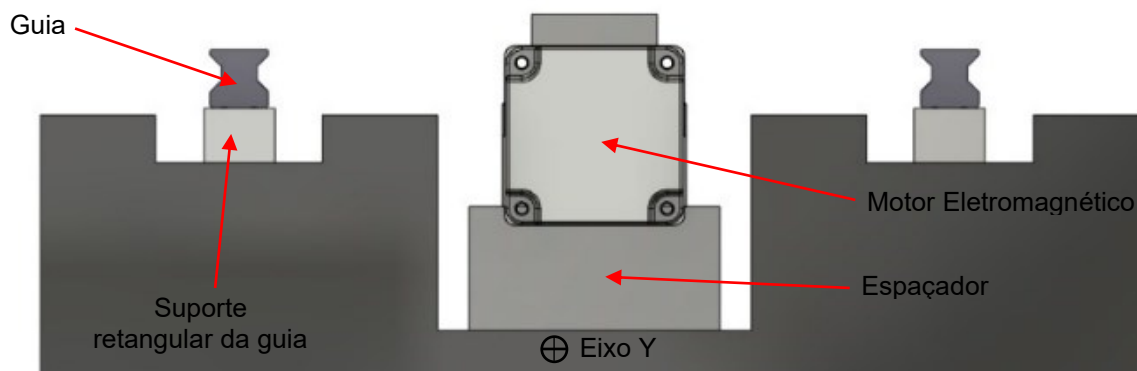


Essas modificações nos patins e decisões de projeto foram descartadas por demandarem usinagem dos patins e dificultarem o alinhamento e montagem das estruturas X e Y.

3.3.8 PROTÓTIPO 8

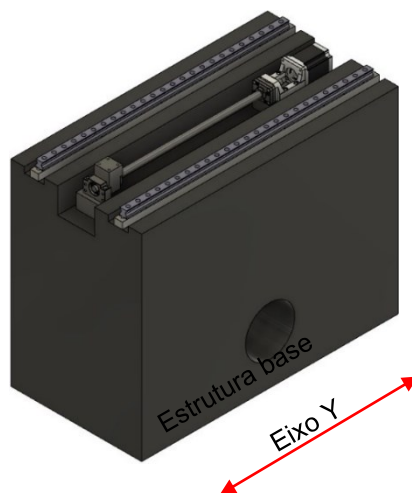
No protótipo 8 os suportes das guias deixaram de ser trapezoidais e passaram a ser retangulares para facilitar a fabricação a partir de chapas laminadas de Aço AISI 1045 com altura final de 36 mm (Figura 3.53).

Figura 3.53 - Vista lateral esquerda da estrutura base em detalhe com suportes retangulares das guias, espaçador, motor e guias do eixo Y.



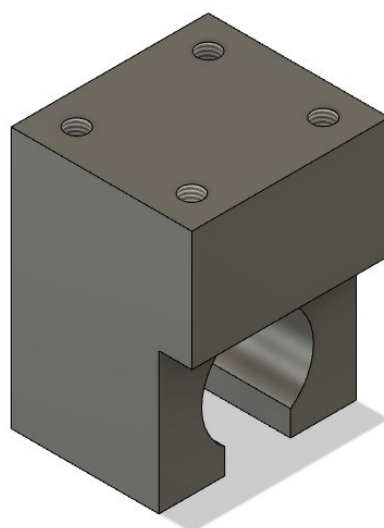
A Estrutura base (Figura 3.54) teve seu comprimento reduzido em 40 mm.

Figura 3.54 - Estrutura base do protótipo 8 da minimáquina-ferramenta com guias, insertos, mancais, fuso, suporte da porca, porca, espaçadores, suporte do motor e motor eletromagnético, em vista isométrica.



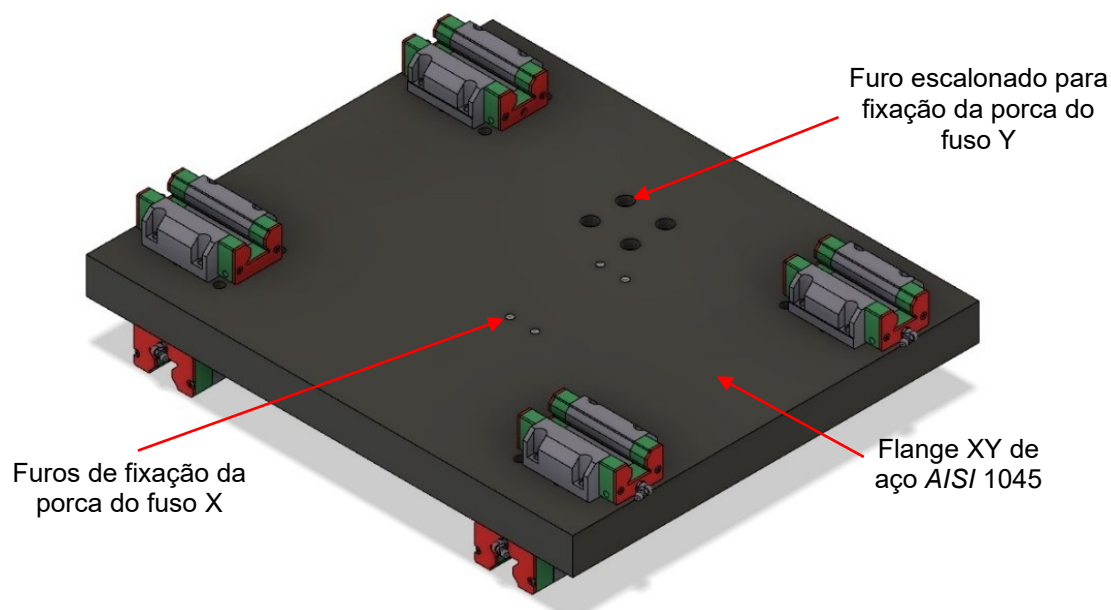
Outra modificação ocorreu no suporte da porca do fuso de esferas recirculantes do eixo Y (Figura 3.55), ao qual foram adicionados furos superiores com roscas M8x1,25x20.

Figura 3.55 - Vista em perspectiva isométrica do suporte da porca do fuso de esferas recirculantes do eixo Y.



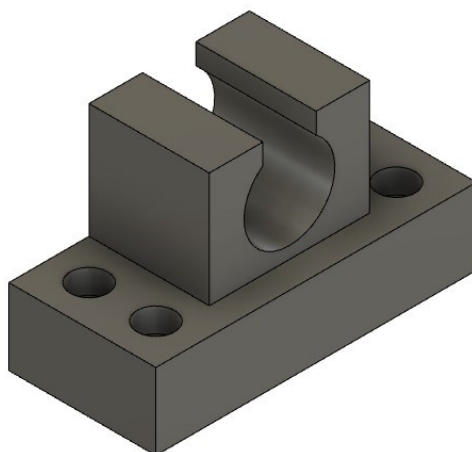
O suporte da porca do fuso Y (Figura 3.55) foi pensado de modo que sua fixação fosse feita pela parte superior do flange XY por meio de parafusos Allen M8 de cabeça cilíndrica (Figura 3.56).

Figura 3.56 - Flange XY do protótipo 8 da minimáquina-ferramenta com patins do eixo X na face superior e furos de montagem dos suportes das porcas dos fusos Y e fuso X em perspectiva isométrica.



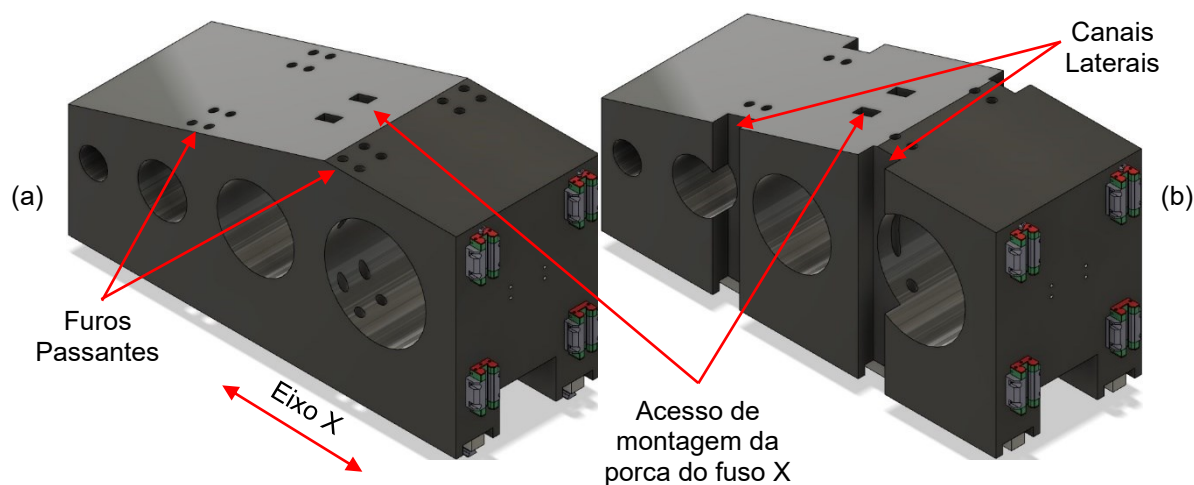
Na oitava versão optou-se pelo aço *AISI 1045* para o flange XY e os suportes das porcas dos fusos. Também foram adicionados furos roscados para fixação dos suportes das porcas dos fusos do eixo Y (Figura 3.55) e do eixo X (Figura 3.57) no flange XY.

Figura 3.57 - Suporte da porca do fuso X vista em perspectiva isométrica.



O suporte da porca do fuso X (Figura 3.57) possui abas laterais com furos passantes. A rosca para aperto dos parafusos Allen M8x1,25 foram localizados no flange XY (Figura 3.56). Na Figura 3.58 são apresentadas duas opções para a estrutura X com o objetivo de investigar opções de fabricação e montagem.

Figura 3.58 - Vista isométrica do projeto 8 da minimáquina-ferramenta. (a) estrutura X com otimização do CG e acessos de montagem dos patins por meio de furos passantes e (b) estrutura X com otimização do CG por meio de furos e acessos de montagem por meio de canais laterais.



As estruturas da Figura 3.58 tiveram seus comprimentos reduzidos em 50 mm. As alturas foram diminuídas em 40 mm. Foram feitos dois acessos centrais de dimensões 50 mm x 25 mm objetivando introduzir os parafusos e ferramenta para fixação do suporte da porca do fuso X. Os acessos aos parafusos do lado interno dos patins do eixo X foram feitos através de um par de furos de diâmetro de 20 mm. A estrutura da Figura 3.58(b) seguiu a ideia do protótipo 6 com canais laterais de 70 mm x 40 mm. A estrutura da Figura 3.58(a) foi idealizada apenas com furos passantes para acessar os parafusos dos patins do eixo X.

A estrutura Z (Figura 3.59) seguiu o princípio de acesso aos patins semelhante a estrutura X da Figura 3.58(a).

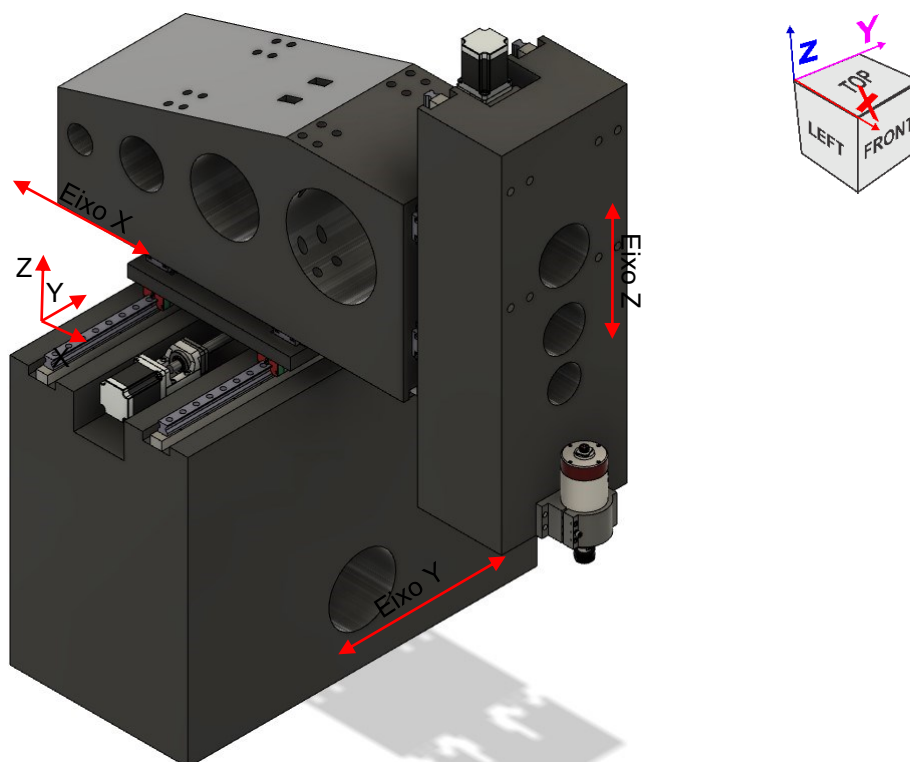
Figura 3.59 - Estrutura Z do protótipo 8 da minimáquina-ferramenta com furos de acesso de montagem dos patins e otimização do CG, em perspectiva.



O comprimento da estrutura Z (Figura 3.59) foi diminuído em 50 mm. O maior furo na face de 150 mm de diâmetro permite acessar os parafusos do suporte da porca do fuso Z.

Foi optado pela estrutura X da Figura 3.58(a) por simplicidade de fabricação. O esboço final do protótipo 8 é apresentado na Figura 3.60 renderizada com diferentes cores para facilitar a identificação dos elementos.

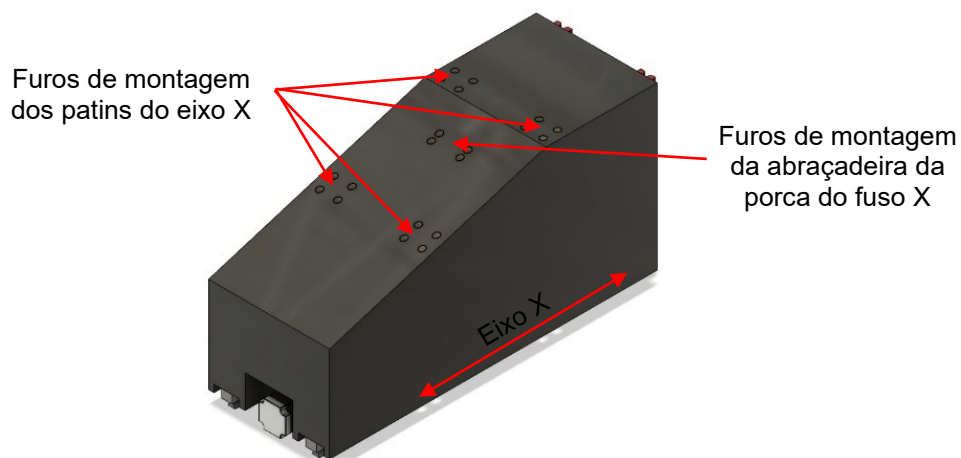
Figura 3.60 - Esboço do protótipo 8 da minimáquina-ferramenta em perspectiva isométrica.



3.3.9 PROTÓTIPO 9

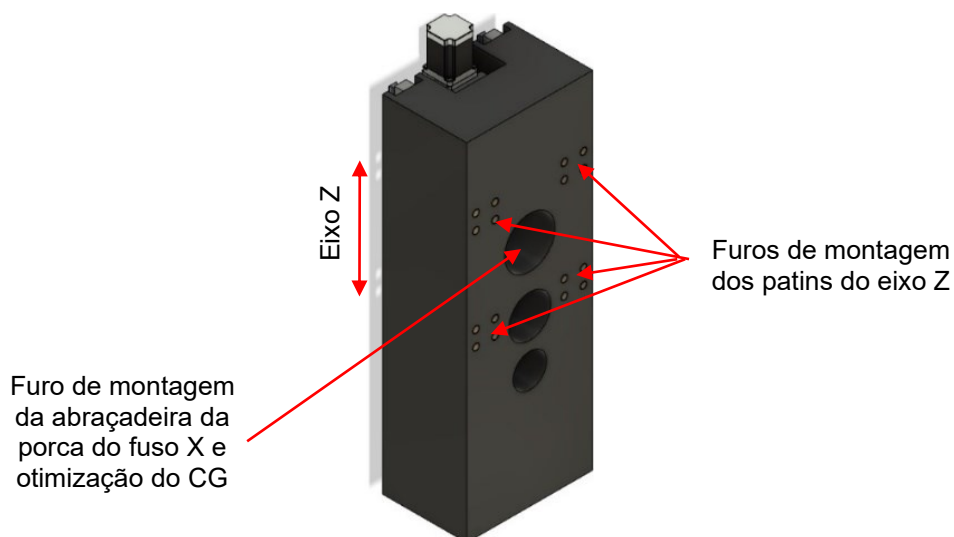
A estrutura base do protótipo 9 ficou exatamente igual à do protótipo 8. O flange XY não sofreu modificação. A estrutura X permaneceu com as mesmas dimensões do protótipo 8, porém com modificações geométricas (Figura 3.61).

Figura 3.61 - Estrutura X do protótipo 9 da minimáquina-ferramenta com furos de montagem dos patins e abraçadeira da porca do fuso X sem furos de otimização do CG em perspectiva isométrica.



Os canais retangulares de acesso aos parafusos do suporte da porca do eixo X da porca do fuso X foram substituídos por quatro furos moldados por tubos de *PVC* de 20 mm de diâmetro. Essas modificações também foram aplicadas a estrutura Z (Figura 3.62).

Figura 3.62 - Estrutura Z do protótipo 9 da minimáquina-ferramenta com furos de otimização do CG e acesso de montagem dos patins do eixo Z em perspectiva isométrica.



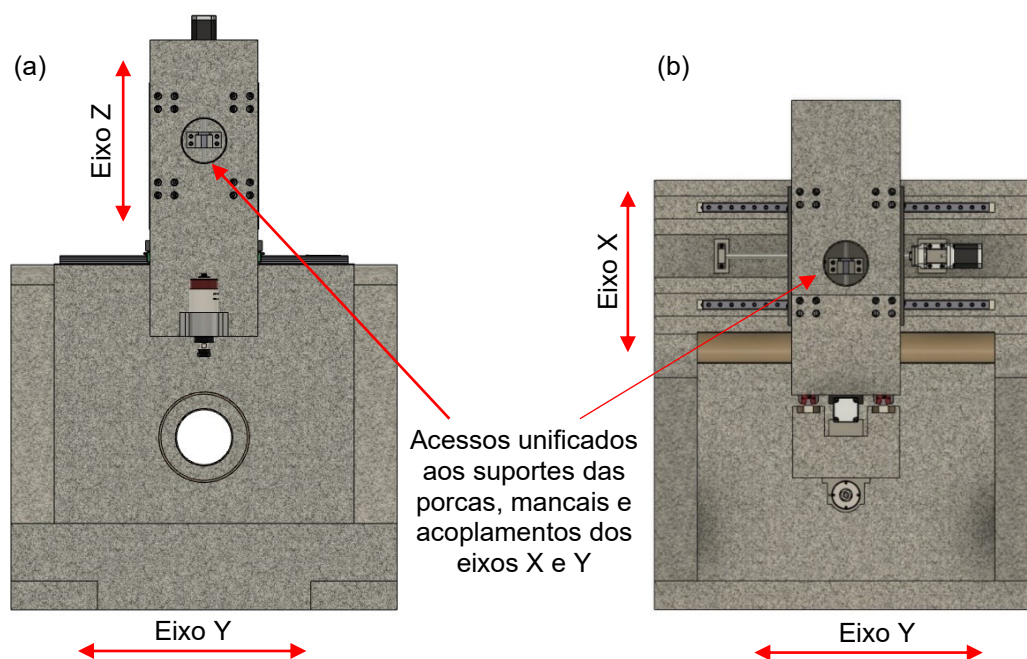
Os furos da face da estrutura Z também foram reposicionados (Figura 3.62). Esse novo alinhamento permitiu acesso simultâneo aos parafusos dos quatro patins e ao suporte da porca do fuso do eixo Z, facilitando as montagens desses elementos.

3.3.10 PROTÓTIPO 10

Ao final de dez iterações completas, limitadas pelo prazo de realização do projeto, chegou-se ao protótipo 10. Optou-se por um projeto sem qualquer alívio de massa ou acesso que não fosse estritamente necessário para montagem. Entendeu-se também que a massa adicional e a geometria simplificada seriam interessantes como ponto de partida para futuras análises de elementos finitos da estrutura em projetos subsequentes do grupo de pesquisa.

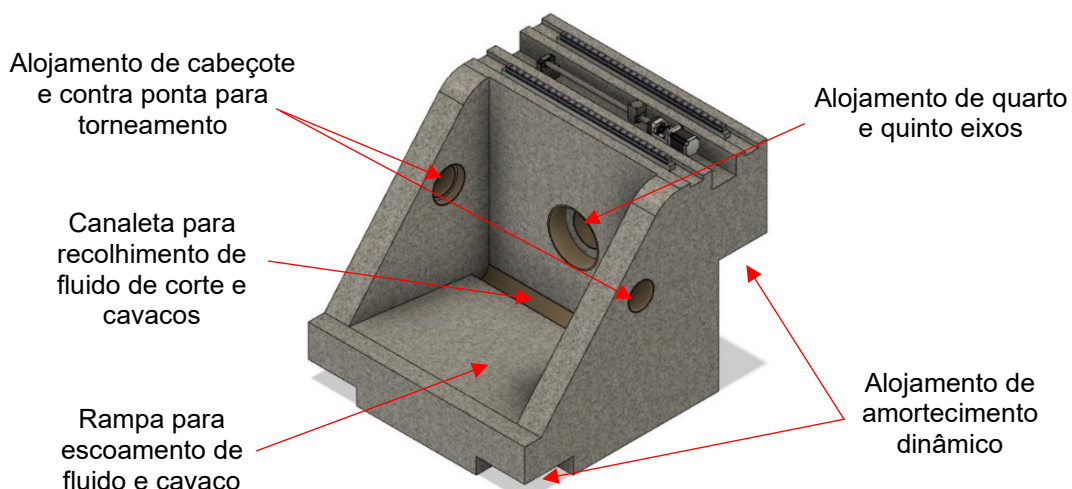
O conjunto de quatro furos que davam acesso aos parafusos do suporte da porca do eixo X e eixo Z foram substituídos por um furo único de maior diâmetro para simplificar o molde e processo de moldagem (Figura 3.63).

Figura 3.63 - Acessos unificados aos suportes das porcas, mancais e acoplamento elástico dos eixos X e Z, (a) vista frontal e (b) vista superior.



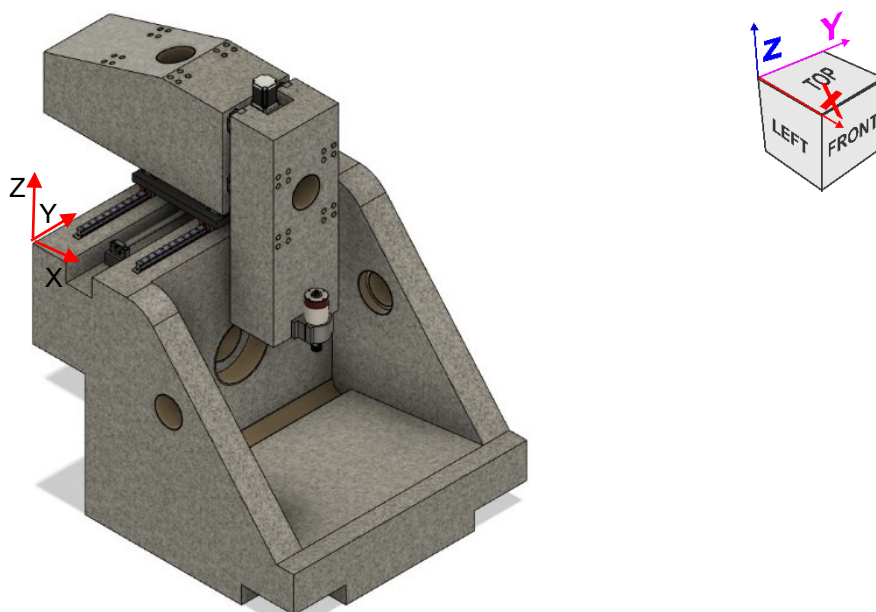
A estrutura base apresentada na Figura 3.64 foi finalmente modelada com vistas aos requisitos de projeto com todas as características que puderam ser adicionadas, incluindo a textura e propriedades do GS. As dimensões externas foram de 1 340 mm de largura, 1 500 mm de profundidade e 1 200 mm de altura, com massa total de 2 574 Kg.

Figura 3.64 - Estrutura base do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta com guias, insertos, mancais, fuso, suporte da porca, porca, espaçadores, suporte do motor, motor eletromagnético e acessos criados com insertos de tubos de PVC em vista isométrica.



A superfície da base interna foi inclinada em direção a uma canaleta para coleta de fluido e resíduos de processos. Também foram finalizados o acesso na face frontal para inserção de uma mesa fixa e posteriormente o quarto e quinto eixos. Dois acessos laterais também foram considerados para futuras atualizações visando cabeçotes e contra pontas para operação de torneamento. Quatro recessos foram adicionados nos quatro cantos da base para alojar amortecedores de vibração. O protótipo final da minimáquina-ferramenta é apresentado na Figura 3.65

Figura 3.65 - Protótipo 10 da minimáquina-ferramenta em perspectiva isométrica.



3.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O tópico 3.4, simulação computacional, foi subdividido em 3.4.1 configuração do ambiente de simulação e 3.4.2 planejamento experimental.

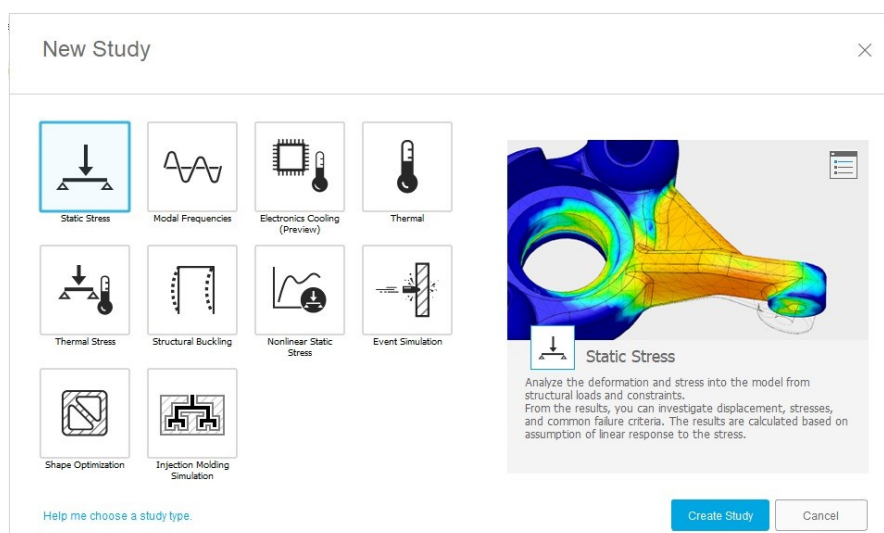
3.4.1 CONFIGURAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

A seguir é detalhado o procedimento para análise estática de elementos finitos no Fusion 360® aplicado ao décimo protótipo.

As imagens a seguir, mostrando as janelas de configuração, foram mantidas na língua inglesa, uma vez que até o término deste trabalho não foi apresentada versão na língua portuguesa. Desta forma, foi mantida a originalidade das figuras para execução passo a passo do processo.

Dentro do ambiente de simulação foi selecionado a opção de tensão estática (*static stress*), conforme mostrado na Figura 3.66.

Figura 3.66 - Menu de seleção do tipo de estudo a ser realizado no Fusion 360®.



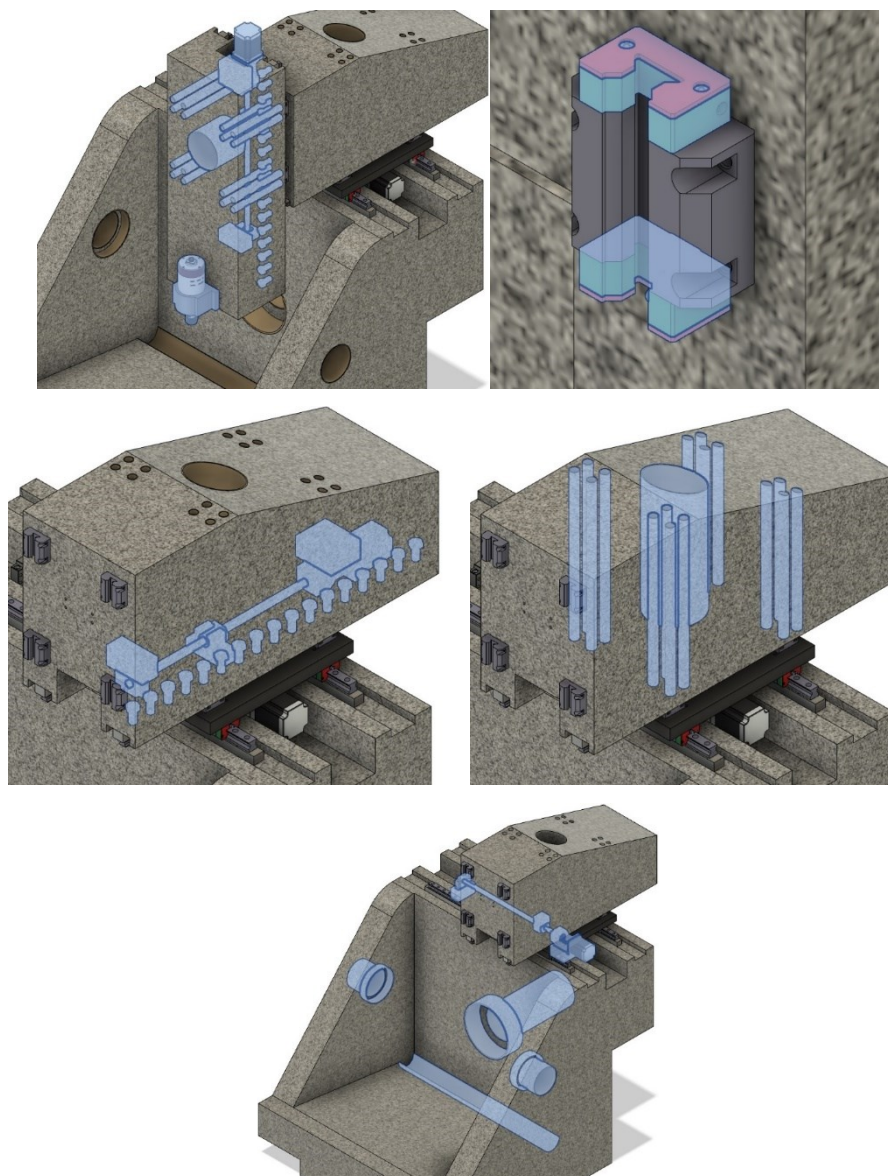
Um ambiente de trabalho voltado a definição de condições de contorno foi aberto. Dentro desse ambiente de análise estrutural estática, o primeiro passo tomado foi a definição do modelo de estudo com a simplificação da estrutura da minimáquina-ferramenta (Figura 3.67).

Figura 3.67 - Botão simplificar a esquerda da paleta de seleção de ferramentas do Fusion 360®.



Todos os itens desnecessários a análise estrutural do GS e componentes mecânicos foram removidos do modelo (Figura 3.68) para reduzir o custo de processamento computacional e evitar problemas de malha e imposição das condições de contorno. Os elementos destacados em azul foram desassociados do modelo.

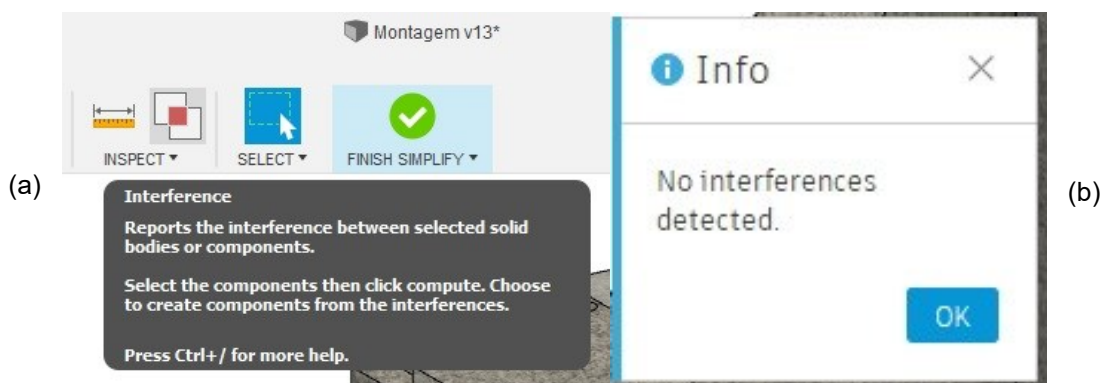
Figura 3.68 - Simplificação do modelo do décimo protótipo com a remoção de elementos desnecessários a análise estrutural estática da minimáquina-ferramenta.



Não houve necessidade de transformar componentes em formas mais primitivas, pois a demanda de processamento foi suprida pela simulação local (microcomputador) e em nuvem.

Dentro do ambiente *Simplify* foi selecionada toda a estrutura e realizada a análise de interferência para averiguar possíveis erros de montagem durante o Projeto Preliminar (Figura 3.69).

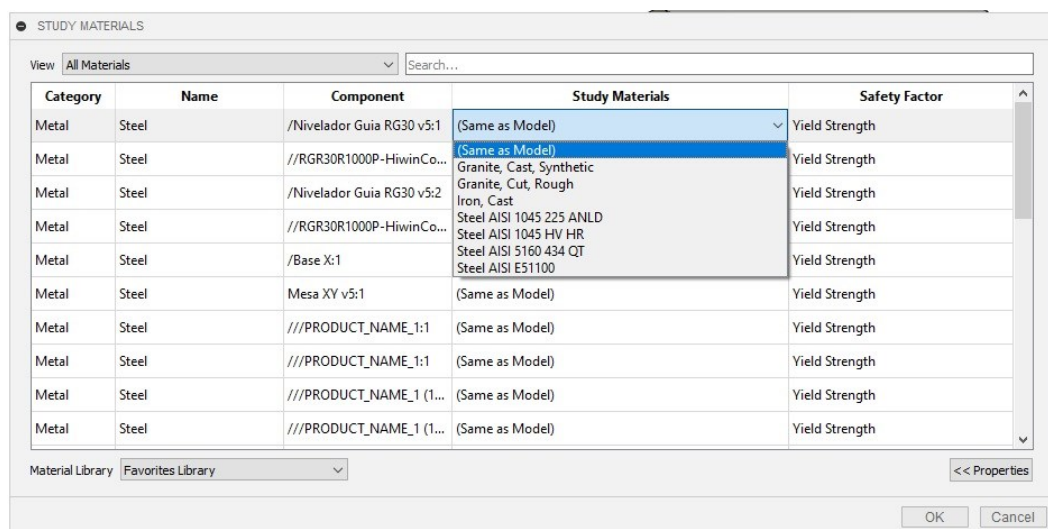
Figura 3.69 - (a) Ferramenta de análise de interferência e (b) resultado da análise no Fusion 360®.



Caso fosse encontrado interferência, bastaria selecionar os elementos identificados e escolher a opção de remover o volume identificado. Não houve interferência na análise do décimo protótipo.

Na ferramenta *Materials* (Figura 3.70), os materiais e suas respectivas propriedades foram selecionados.

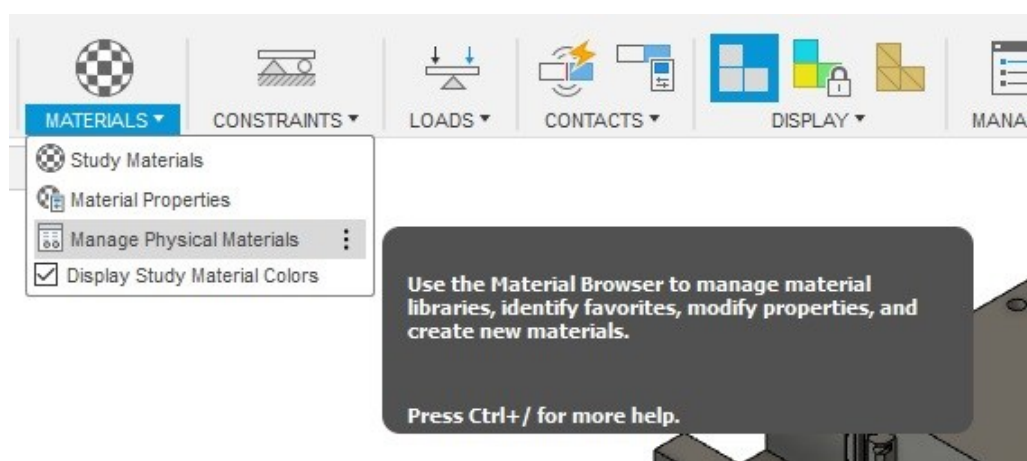
Figura 3.70 - Seleção de materiais da minimáquina-ferramenta no Fusion 360®.



Foram considerados três materiais estruturais; aço *AISI* 1045, aço *AISI* E51100 e GS. As propriedades do Aço *AISI* 1045 já estavam disponíveis na biblioteca e a seleção foi direta (Figura 3.70).

As propriedades do GS e do *AISI* E51100 não estavam disponíveis na biblioteca de materiais do Fusion 360® e foram adicionados por meio da função *Manage Physical Materials* (Figura 3.71).

Figura 3.71 - Ferramenta de gerenciamento de propriedades de materiais do Fusion 360®.



Para adicionar um novo material, basta duplicar algum existente e editar as propriedades.

As propriedades do GS foram definidas conforme exemplificado na Figura 3.72 e valores de referência da Tabela 3.1.

Figura 3.72 - Propriedades do GS adicionados a biblioteca do Fusion 360®.

▼ Basic Thermal	
Thermal Conductivity	1,750E+00 W/(m·K)
Specific Heat	0,100 J/(g·°C)
Thermal Expansion Coefficient	16,000 µm/(m·°C)
▼ Mechanical	
Young's Modulus	23,400 GPa
Poisson's Ratio	0,20
Shear Modulus	40,000 MPa
Density	2,300 g/cm³
Damping Coefficient	0,02
▼ Strength	
Yield Strength	21,000 MPa
Tensile Strength	27,000 MPa

(Tabela 3.1. ATES; GERGER, 2013; KEPCZAK; PAWLOWSKI, 2013; RODRIGUES, 2022).

As propriedades Aço AISI E51100 foram obtidas de *MatWeb* (2022) (Figura 3.73).

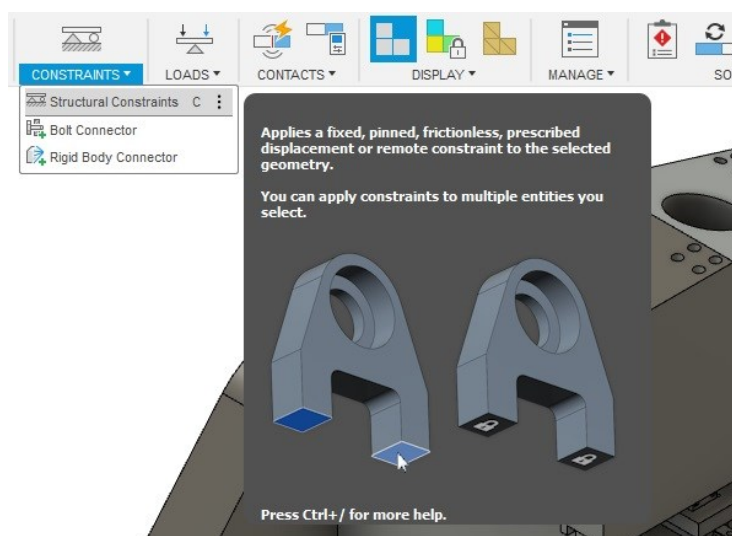
Figura 3.73 - Propriedades do Aço AISI E51100 adicionadas ao Fusion 360®.

▼ Basic Thermal	
Thermal Conductivity	4,660E+01 W/(m·K)
Specific Heat	0,475 J/(g·°C)
Thermal Expansion Coefficient	12,000 µm/(m·°C)
▼ Mechanical	
Young's Modulus	205,000 GPa
Poisson's Ratio	0,29
Shear Modulus	80000,000 MPa
Density	7,850 g/cm ³
Damping Coefficient	0,00
▼ Strength	
Yield Strength	1487,000 MPa
Tensile Strength	1584,000 MPa

(MATWEB, 2022).

As restrições estruturais de movimento (Figura 3.74) foram adicionadas após a escolha dos materiais para cada elemento que compõe a minimáquina-ferramenta.

Figura 3.74 - Ferramenta para seleção de restrições estruturais do Fusion 360®.



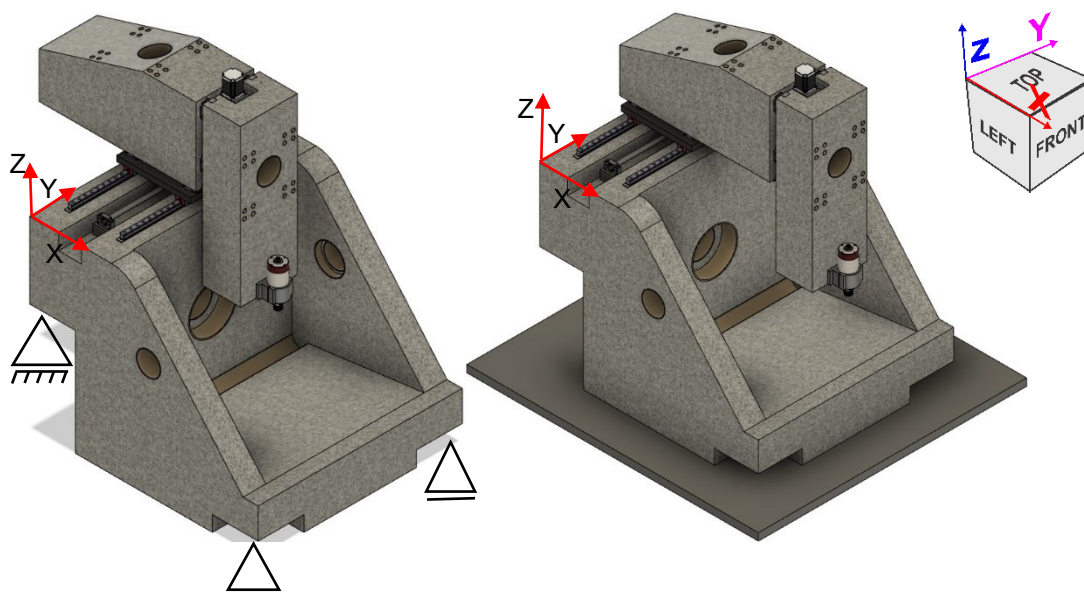
As restrições aplicadas foram do tipo totalmente engastado e sem atrito. A restrição totalmente engastada bloqueia toda movimentação da superfície, seja de

translação ou rotação. Restrição sem atrito bloqueia a rotação da superfície, porém, permite a translação no plano que a superfície se encontra.

Foram considerados dois tipos de engastamentos da estrutura base, quais sejam:

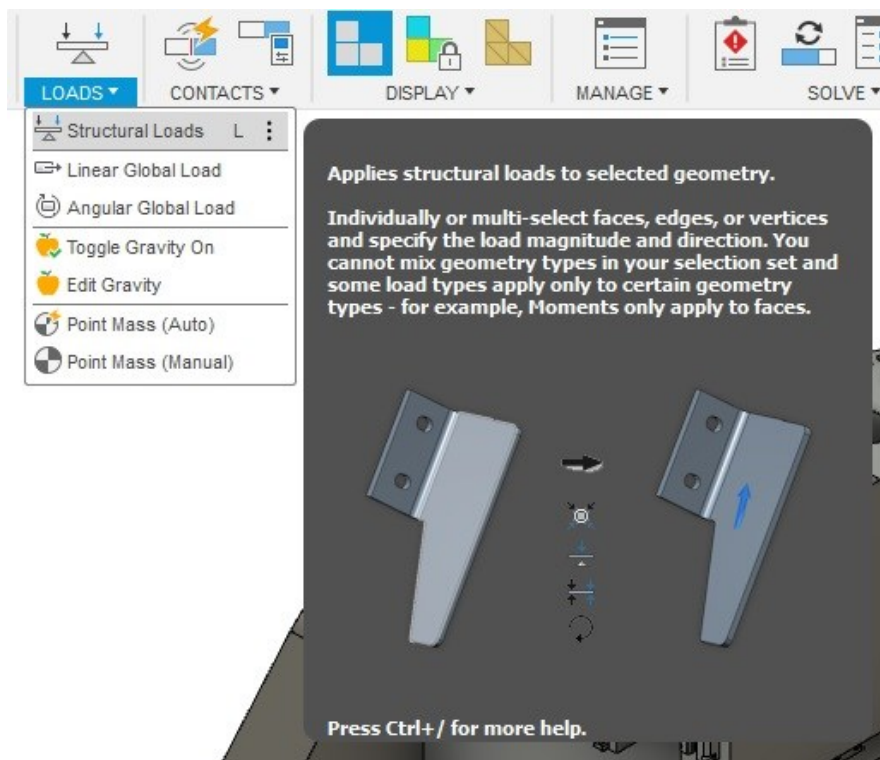
1. Apoios engastados: três livres em XY e restritos em Z e um com restrições em XYZ (Figura 3.75a); e
2. Apoio da base da estrutura sobre uma mesa de Aço *AISI* 1045 com dimensões de 2 000 mm x 1 840 mm x 50 mm na condição de contato rugoso (Figura 3.75b). Os corpos que estão sob essa condição de contato não podem penetrar um no outro, porém pode se separar parcial ou totalmente. Enquanto permanecem em contato, não podem realizar deslizamento relativo entre suas superfícies.

Figura 3.75 - (a) Protótipo 10 em vista isométrica com os apoios engastados representados esquematicamente em vista isométrica. (b) Protótipo 10 sobre uma mesa de Aço *AISI* 1045 de dimensões de 2 000 mm x 1 840 mm x 50 mm com contato rugoso em vista isométrica.



As condições com engastamentos aplicados nos quatro apoios foram denominadas de engastamento 1 e as condições de apoio sobre a mesa de aço de engastamento 2. Em seguida foram aplicados os carregamentos na estrutura (Figura 3.76).

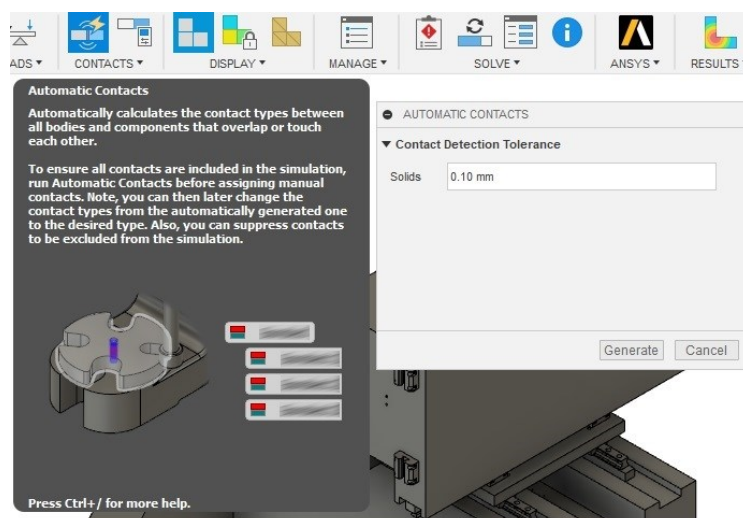
Figura 3.76 - Ferramenta para adição de carregamento no Fusion 360®.



No menu de seleção decidiu-se em quais casos se consideraria a ação da gravidade e em quais casos não. Os carregamentos aplicados e suas intensidades foram somente do tipo Força aplicada em uma área, sendo essa a área de montagem do suporte do *spindle* na estrutura Z.

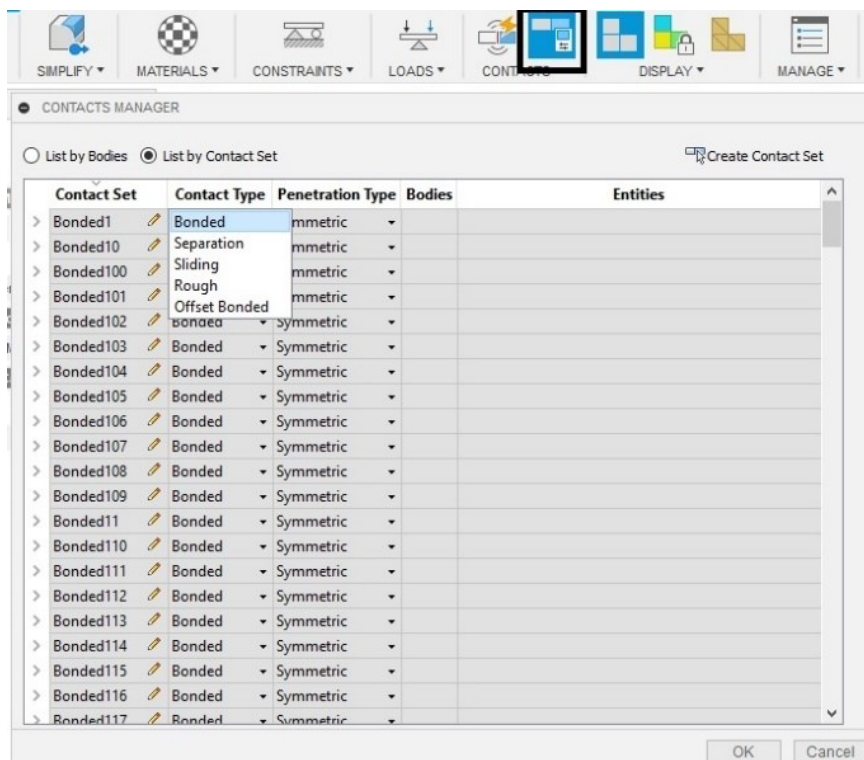
Foram adotadas as condições de contato entre as faces de duas peças (Figura 3.77).

Figura 3.77 - Recurso para gerar contato automaticamente do Fusion 360®.



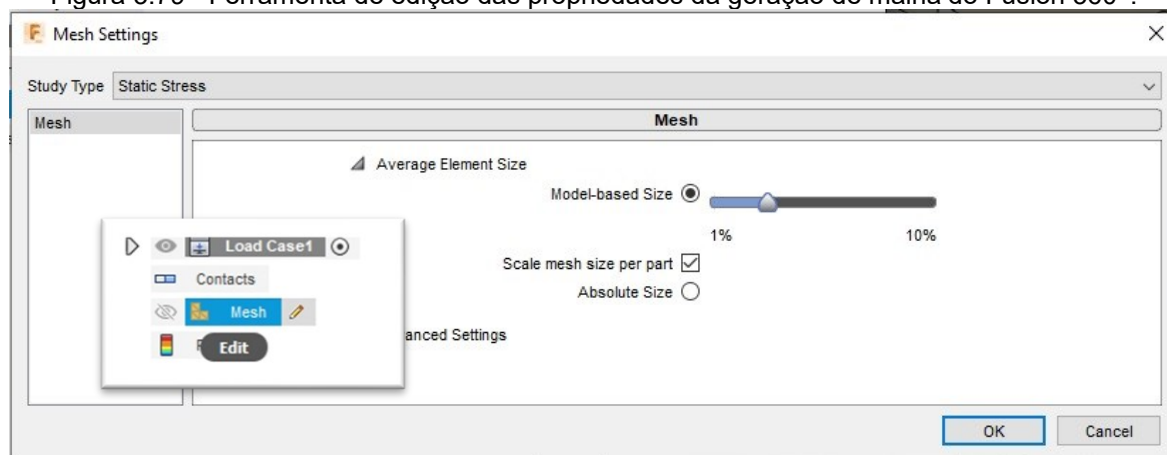
Todos os contatos ou afastamentos de superfícies inferiores a 0,1 mm foram considerados ligados (*bonded*), conforme apresentado na Figura 3.78.

Figura 3.78 - Tabela de gerenciamento de contatos do Fusion 360®.



Por meio da ferramenta de edição de malha (Figura 3.79), o tamanho médio do elemento foi reduzido e as configurações avançadas foram mantidas como padrão.

Figura 3.79 - Ferramenta de edição das propriedades da geração de malha do Fusion 360®.

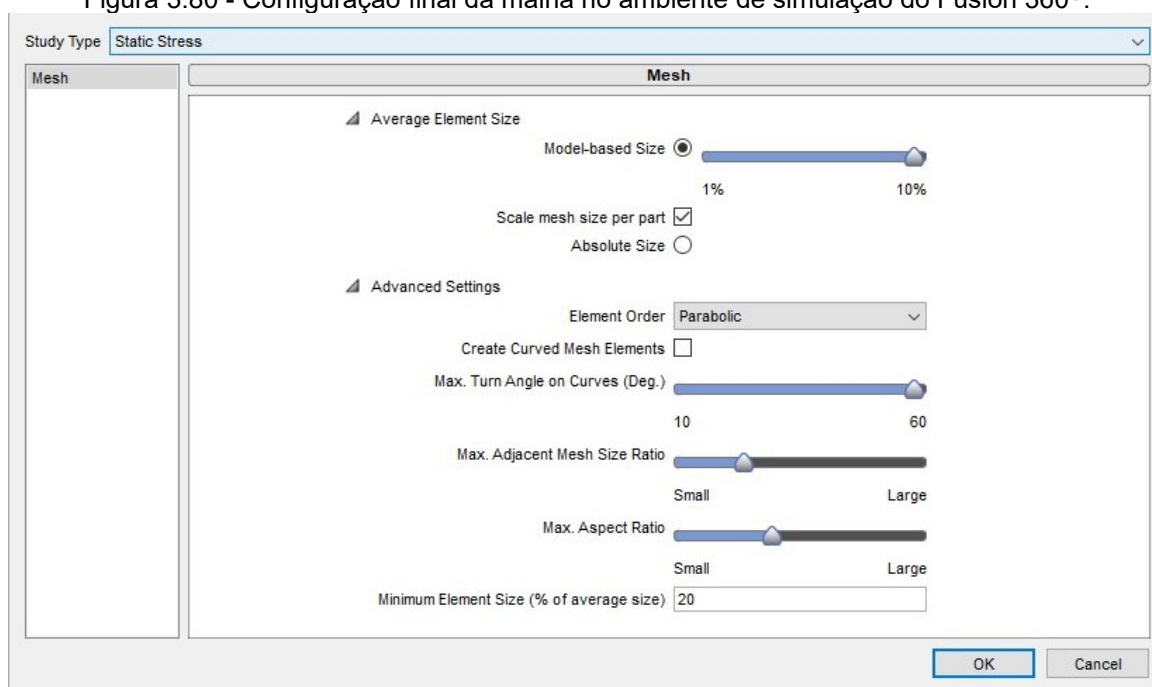


Na opção *Model based size* selecionou-se o menor valor possível, 3 %, recomendado pela própria Autodesk® para aqueles que não possuem um *hardware* de alto desempenho de processamento.

A configuração final da malha, apresentada na Figura 3.80, foi a seguinte:

- Tamanho médio dos elementos: 3 % do tamanho do sólido;
- Malha com seu tamanho dimensionado de acordo com o tamanho do objeto;
- Tipo da malha: parabólica; e
- Tamanho mínimo de um elemento de malha: 20 % do tamanho médio da malha.

Figura 3.80 - Configuração final da malha no ambiente de simulação do Fusion 360®.



Com todas as condições de contorno definidas e a malha gerada sem erros (Figura 3.81), utilizou-se do recurso de solucionar as simulações na nuvem, recurso gratuito disponibilizado pela Autodesk® no apoio ao ensino e pesquisa em instituições de ensino.

Figura 3.81 - Recurso de verificação das condições de contorno (botão da esquerda) e de execução da simulação (segundo botão da direita) do Fusion 360®.



3.4.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

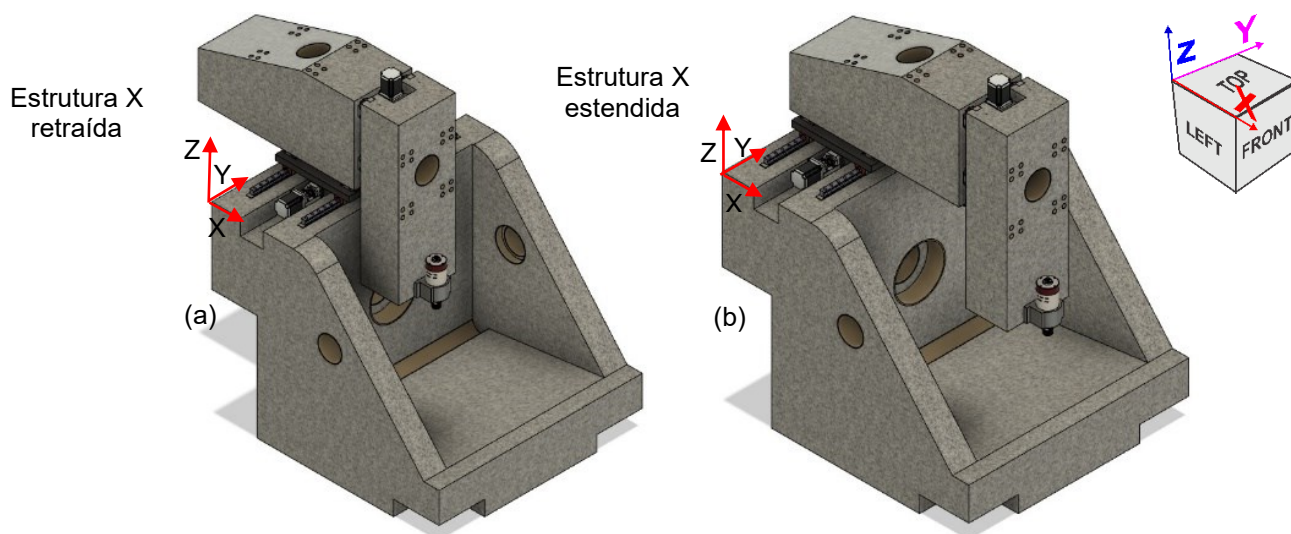
O planejamento experimental para simulação de desempenho estático da estrutura é apresentado na Tabela 3.8, considerando condições de engastamento, posição da estrutura X, caso, módulo, direção e sentido da força externa.

Tabela 3.8 - Planejamento experimental da análise estática da estrutura da minimáquina-ferramenta.

Engastamento	Posição	Caso	Módulo da força (N)	Direção e sentido
Engastamento 1	1 (Estrutura X retraída)	1	100	Y
		2	0	Não se aplica
		3	100	Y
		4	100	- Z
		5	100	X; Y; - Z
	2 (Estrutura X expandida)	1	100	Y
		2	0	Não se aplica
		3	100	Y
		4	100	- Z
		5	100	X; Y; - Z
Engastamento 2	1 (Estrutura X retraída)	1	100	Y
		2	0	Não se aplica
		3	100	Y
		4	100	- Z
		5	100	X; Y; - Z
	2 (Estrutura X expandida)	1	100	Y
		2	0	Não se aplica
		3	100	Y
		4	100	- Z
		5	100	X; Y; - Z

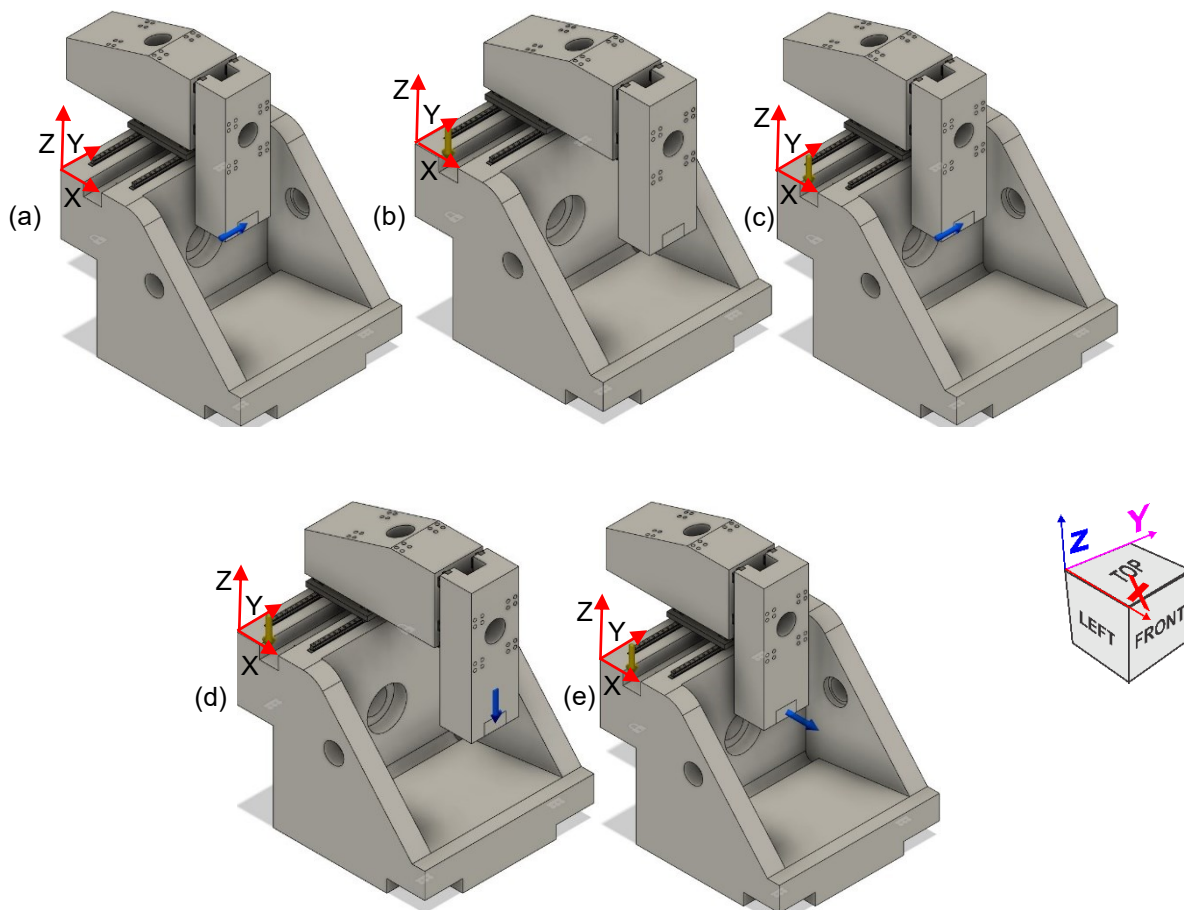
Foram consideradas duas posições da estrutura X (Figura 3.82) para realizar a análise estática de desempenho. A estratégia de escolha ocorreu onde os esforços gerados pelas forças atuantes na estrutura teriam o potencial de gerar tensões e torções máximas na minimáquina-ferramenta. Ambas as posições foram chamadas de críticas.

Figura 3.82 - Posições críticas da estrutura da minimáquina-ferramenta consideradas para simulação. (a) estrutura X retraída e (b) estendida.



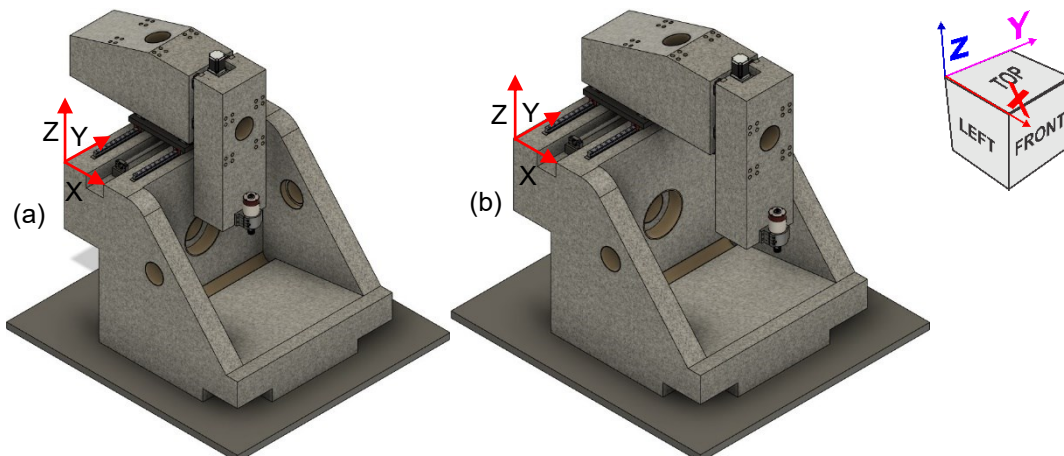
Na primeira posição (Figura 3.82a) a estrutura X foi completamente retraída, com distância entre as faces da estrutura Z e estrutura base de 289,5 mm. Na segunda posição (Figura 3.83b) a estrutura X foi completamente estendida, com distância da face frontal da estrutura Z até a face da estrutura base de 788,5 mm. Em ambos os casos a estrutura Z ficou completamente abaixada. As condições de força e ação da gravidade (Figura 3.83) foram as mesmas independentemente da posição.

Figura 3.83 - (a) considera força de usinagem de 100 N no sentido positivo do eixo Y sem atuação da gravidade. (b) somente atuação da gravidade na estrutura. (c) combinação da condição (a) com atuação da gravidade. (d) força de 100 N com direção e sentido negativo do eixo Z com atuação da gravidade. (e) força de 50 N no sentido positivo do eixo Y, 70,711 N no sentido positivo do eixo X e 50 N no sentido negativo do eixo Z com ação da gravidade.



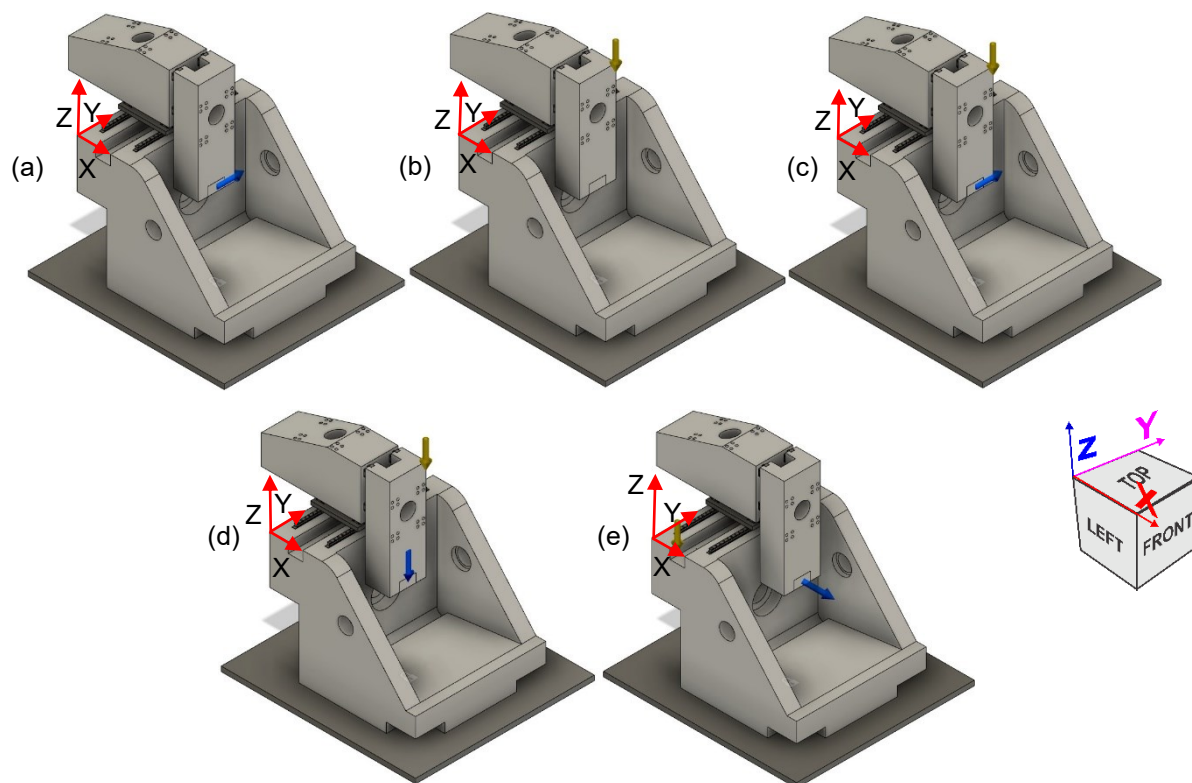
As mesmas duas posições da estrutura X também foram consideradas para o engastamento 2 (Figura 3.84).

Figura 3.84 - Posições críticas da estrutura da minímáquina-ferramenta consideradas para simulação. (a) Estrutura X retraída e (b) estendida.



As condições de aplicação da força de usinagem e gravidade nesta configuração (Figura 3.85) foram as mesmas (Figura 3.84).

Figura 3.85 - (a) considera força de usinagem de 100 N no sentido positivo do eixo Y sem atuação da gravidade. (b) somente atuação da gravidade na estrutura. (c) combinação da condição (a) com atuação da gravidade. (d) força de 100 N com direção e sentido negativo do eixo Z com atuação da gravidade. (e) força de 50 N no sentido positivo do eixo Y, 70,711 N no sentido positivo do eixo X e 50 N no sentido negativo do eixo Z com ação da gravidade.



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

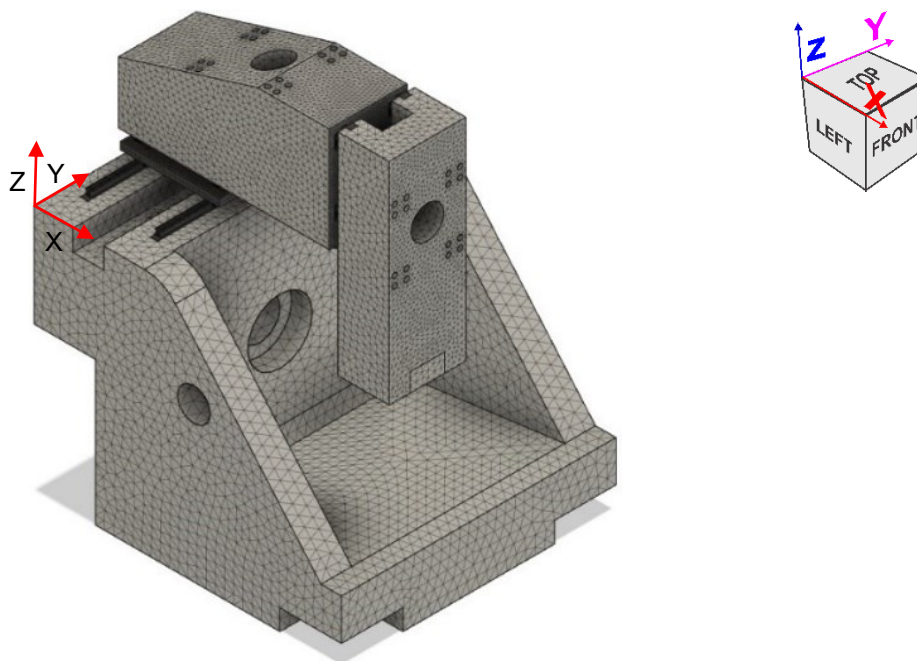
Foram idealizados e analisados dez protótipos gradativamente evoluídos, considerando o desempenho mecânico e os principais aspectos das etapas de fabricação dos moldes, moldagem e desmoldagem do GS, montagem dos elementos mecânicos, acessos de montagem, alinhamentos e manutenção da máquina multifuncional proposta. O resultado das dez iterações de projeto é o protótipo 10, o qual foi analisado por elementos finitos para investigar o desempenho da estrutura frente aos requisitos de projeto.

A seguir são apresentados e discutidos os principais resultados da análise de elementos finitos da estrutura mecânica da minimáquina-ferramenta de GS quanto as tensões e deformações, reações de apoio e fatores de segurança de acordo com o planejamento experimental proposto.

4.1 ENGASTAMENTO 1

A malha de elementos finitos tetraédricos na condição de engastamento 1 e posição 2 apresentou 3 925 742 nós e 2 610 301 elementos (Figura 4.1).

Figura 4.1 - Vista em perspectiva isométrica da malha de elementos finitos tetraédricos (3 921 092 nós e 2 607 055 elementos) na condição de engastamento 1 e posição 2 da minimáquina-ferramenta.

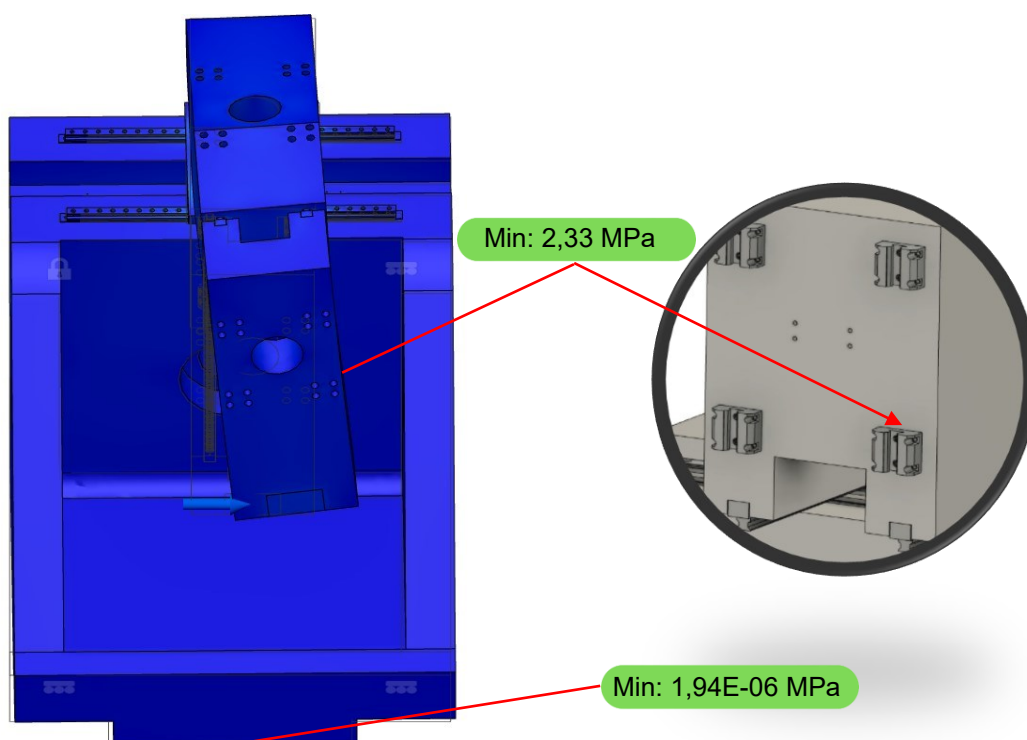


4.1.1 CASO 1

As condições de contorno do engastamento 1, posição 2 e caso 1 resultaram em tensões máxima e mínima de 2,332 MPa e $1,194 \times 10^{-6}$ MPa, respectivamente, conforme apresentado na Figura 4.2.

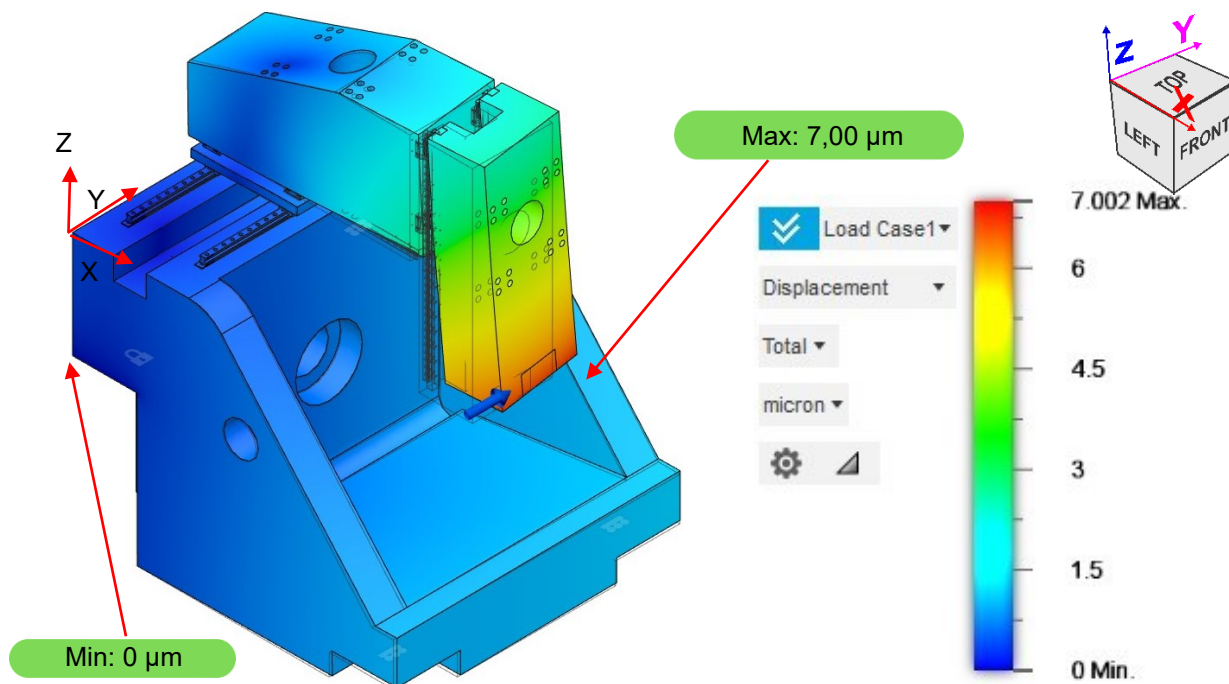
A região de máxima tensão ocorreu no patim inferior direito da Estrutura Z que foi modelado em aço E51100 e não ultrapassou seu limite de escoamento (1 487 MPa).

Figura 4.2 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y com resultados das tensões máxima e mínima.



Na Figura 4.3 é mostrada as deformações da minimáquina. As deformações máxima e mínima foram de $7,002 \mu\text{m}$ e zero, respectivamente.

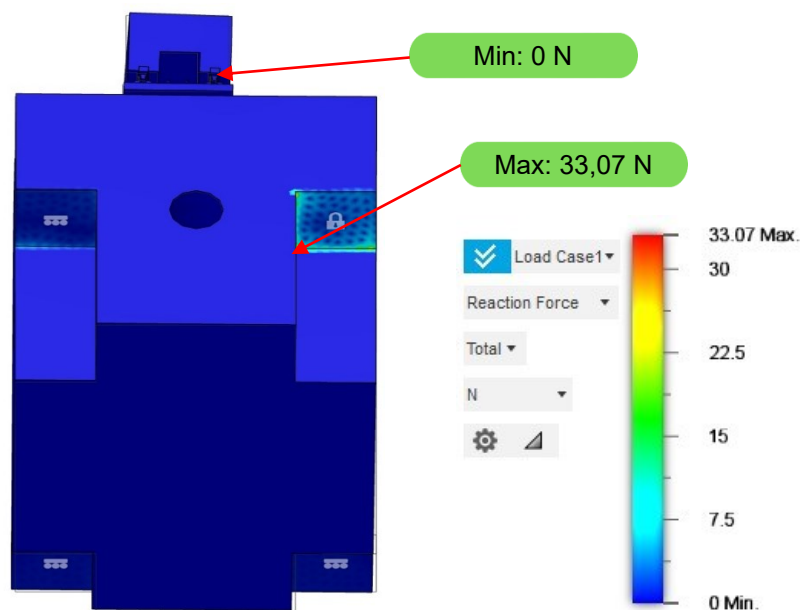
Figura 4.3 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y com resultados das deformações máxima e mínima.



A máxima deformação foi 7 vezes superior ao especificado em projeto de 1 µm.

As forças de reação nos apoios da estrutura base de GS são mostradas na Figura 4.4.

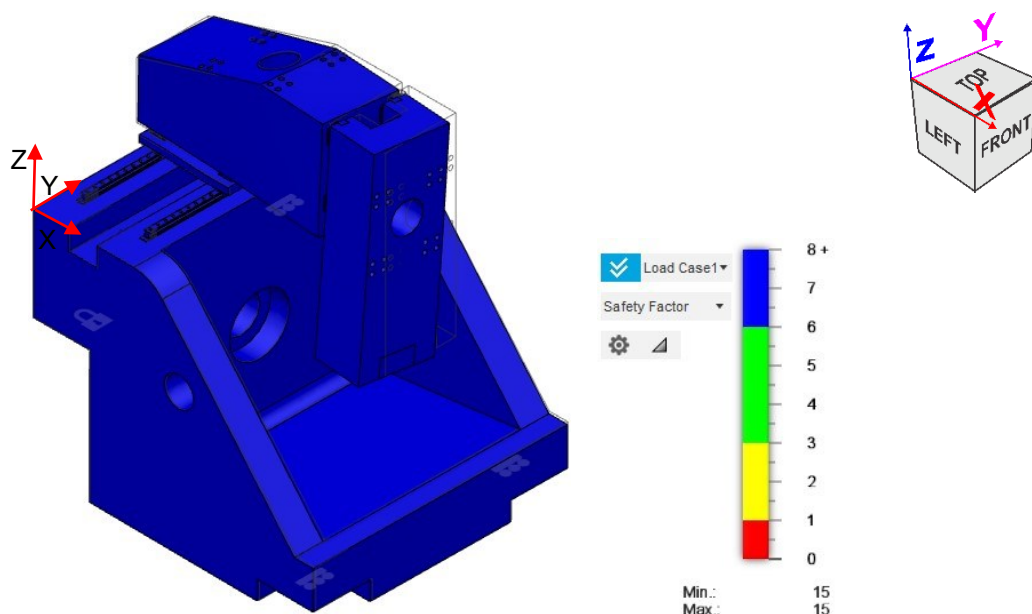
Figura 4.4 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y com resultados das reações de apoio.



Desconsiderando a força gravitacional, a máxima força da reação de apoio foi de 33,07 N.

Na Figura 4.5 é mostrada a minimáquina em perspectiva isométrica com representação gráfica do fator de segurança. A análise revela que as tensões mecânicas desenvolvidas na estrutura nas condições impostas foram quinze vezes menores que a tensão de escoamento. Os demais casos apresentaram resposta do fator de segurança similares a esta e as respectivas imagens não foram apresentadas.

Figura 4.5 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y com resultados do fator de segurança.



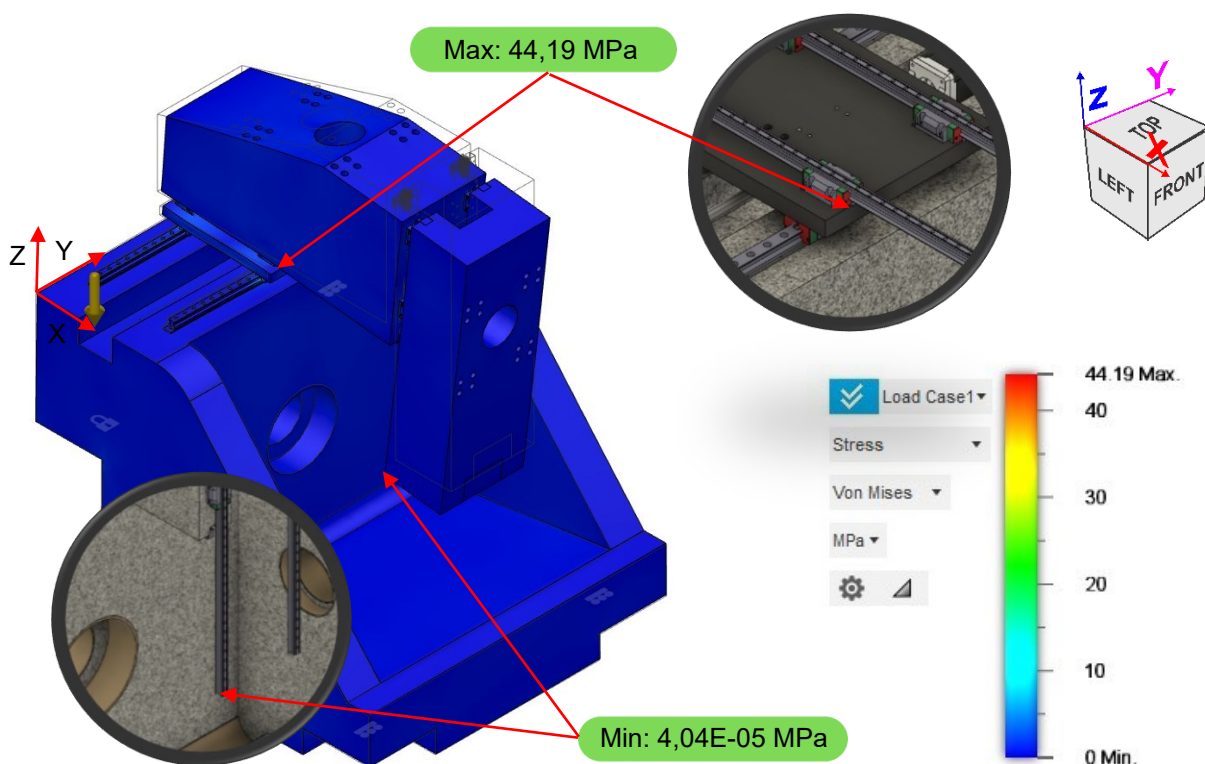
Os resultados apontam que não foram identificadas regiões em que os materiais da máquina poderiam entrar em fase de escoamento devido as cargas estáticas aplicadas.

4.1.2 CASO 2

As condições de contorno do engastamento 1, posição 2 e caso 2 resultaram em tensões máxima e mínima de 44,19 MPa e $4,038 \times 10^{-5}$ MPa, respectivamente, conforme representado na Figura 4.6.

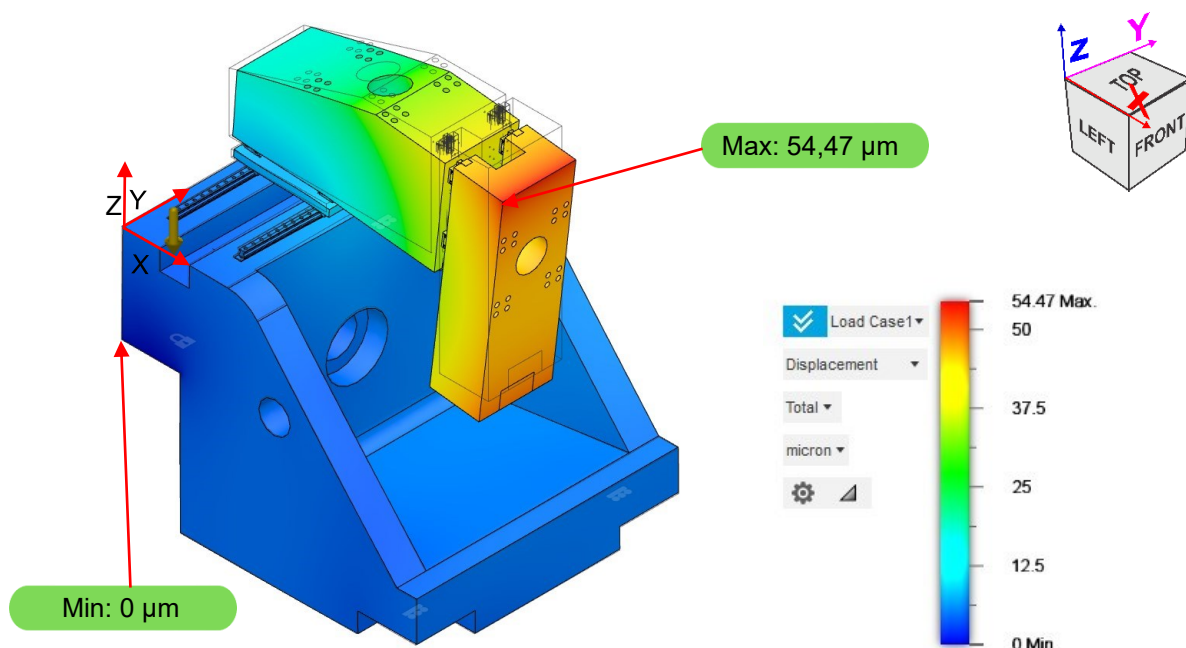
A região de máxima tensão ocorreu na guia esquerda da Estrutura X, logo a frente do patim frontal, que foi modelada em aço E51100 e não ultrapassou seu limite de escoamento (1 487 MPa).

Figura 4.6 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a ação da gravidade com resultados das tensões máxima e mínima.



Na Figura 4.7 é mostrada em perspectiva isométrica as deformações da minimáquina. As deformações máxima e mínima foram de 54,47 μm e zero, respectivamente.

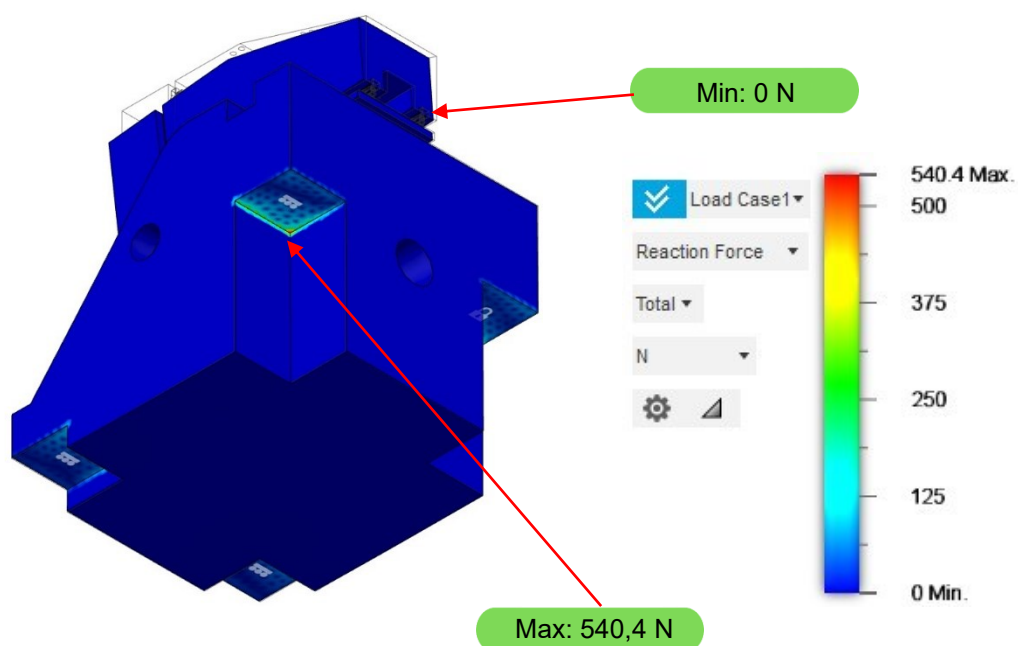
Figura 4.7 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a ação da gravidade com resultados das deformações máxima e mínima.



A máxima deformação foi 54,47 vezes superior ao especificado em projeto de 1 μm .

As forças de reação nos apoios da estrutura base de GS são mostradas na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a ação da gravidade com resultados das reações de apoio.



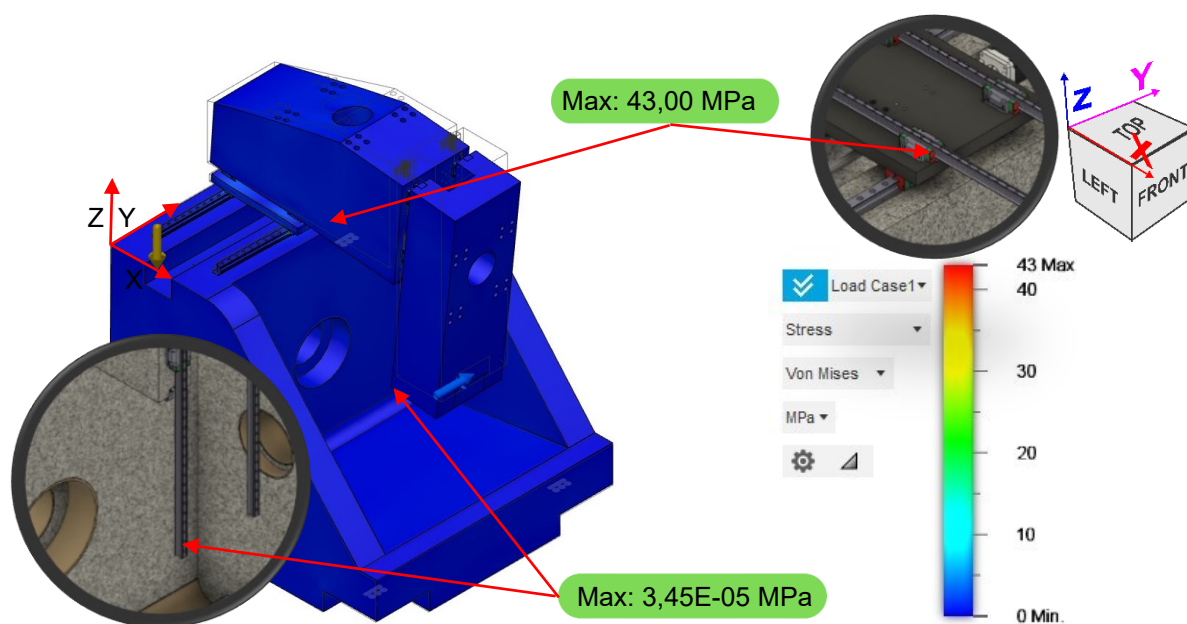
Considerando a força gravitacional, a máxima força da reação de apoio foi de 540,4 N e a mínima zero.

4.1.3 CASO 3

As condições de contorno do engastamento 1, posição 2 e caso 3 resultaram em tensões máxima e mínima de 37,54 MPa e $3,241 \times 10^{-5}$ MPa, respectivamente, conforme apresentado na Figura 4.9.

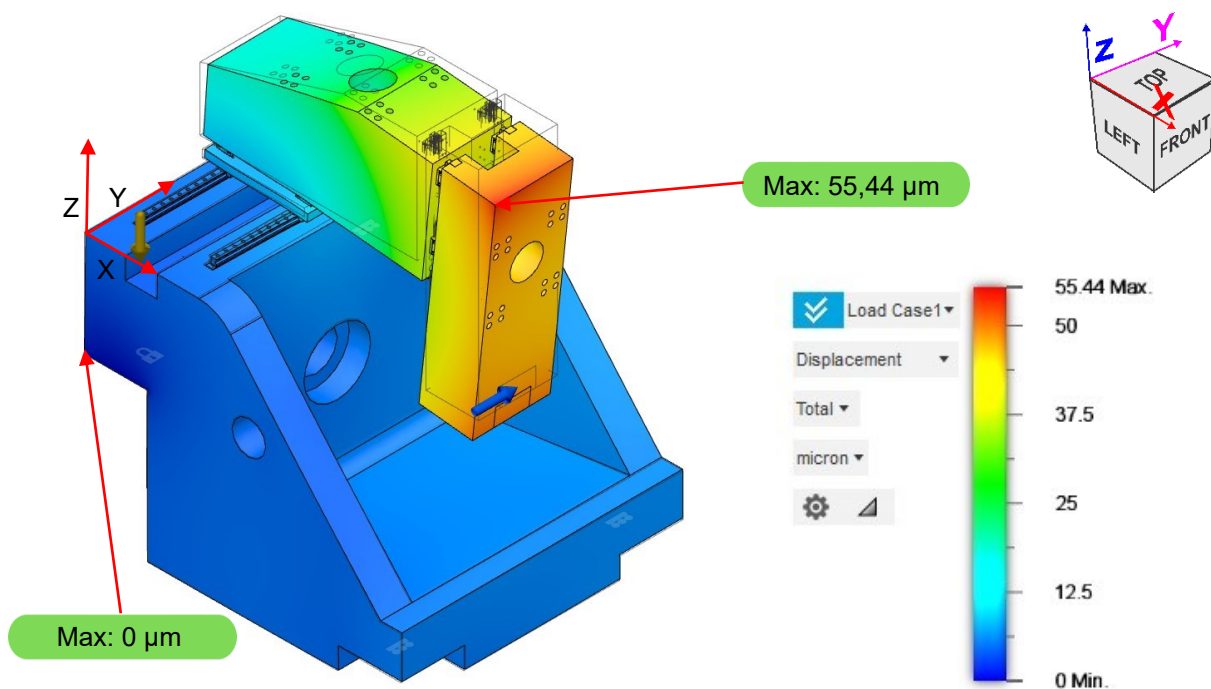
A região de máxima tensão ocorreu na guia esquerda da estrutura X, logo a frente do patim frontal, que foi modelada em aço E51100 e não ultrapassou seu limite de escoamento (1 487 MPa).

Figura 4.9 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y e sob a ação da gravidade com resultados das tensões máxima e mínima.



Na Figura 4.10 é mostrada em perspectiva isométrica as deformações da minimáquina. As deformações máxima e mínima foram de 55,4 μm e zero, respectivamente.

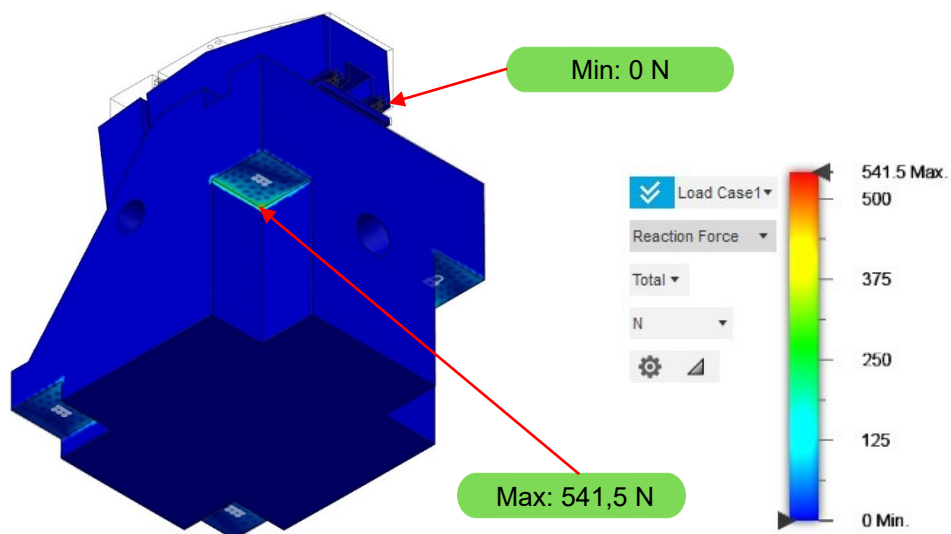
Figura 4.10 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y e sob ação da gravidade com resultados das deformações máxima e mínima.



A máxima deformação foi 55,44 vezes superior ao especificado em projeto de 1 μm .

As forças de reação nos apoios da estrutura base de GS são mostradas na Figura 4.11.

Figura 4.11 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y e sob ação da gravidade com resultados das reações de apoio.



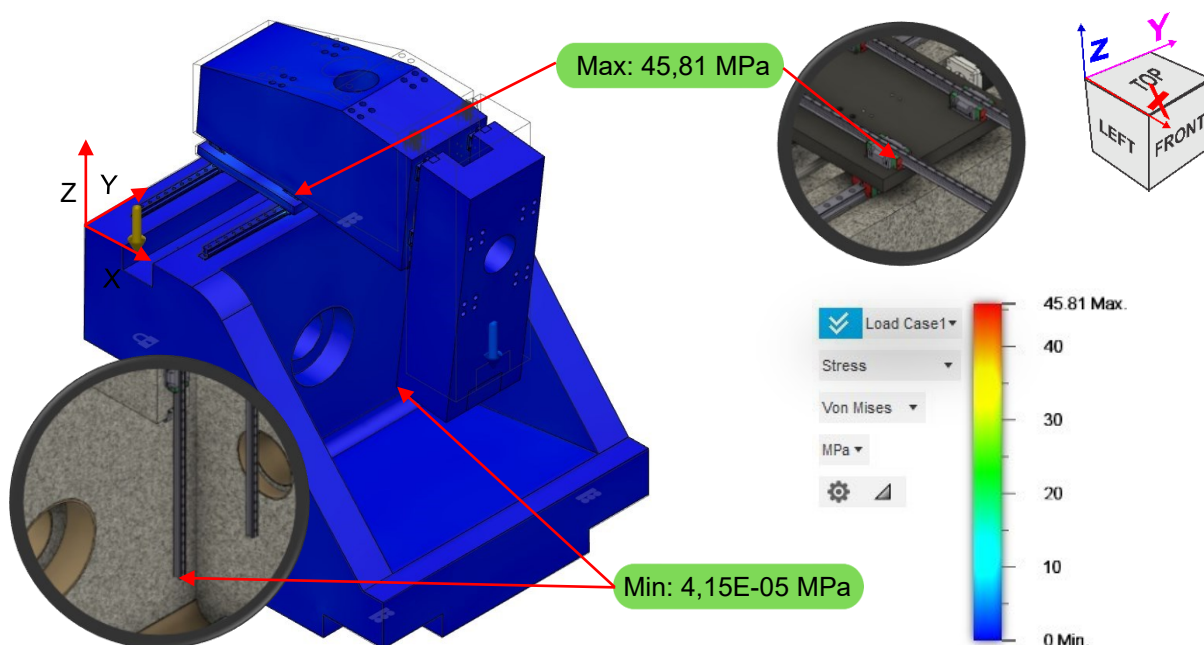
Considerando a força gravitacional, a máxima força da reação de apoio foi de 541,5 N e a mínima zero.

4.1.4 CASO 4

As condições de contorno do engastamento 1, posição 2 e caso 4 resultaram em tensões máxima e mínima de 45,81 MPa e $4,151 \times 10^{-5}$ MPa, respectivamente, conforme apresentado na Figura 4.12.

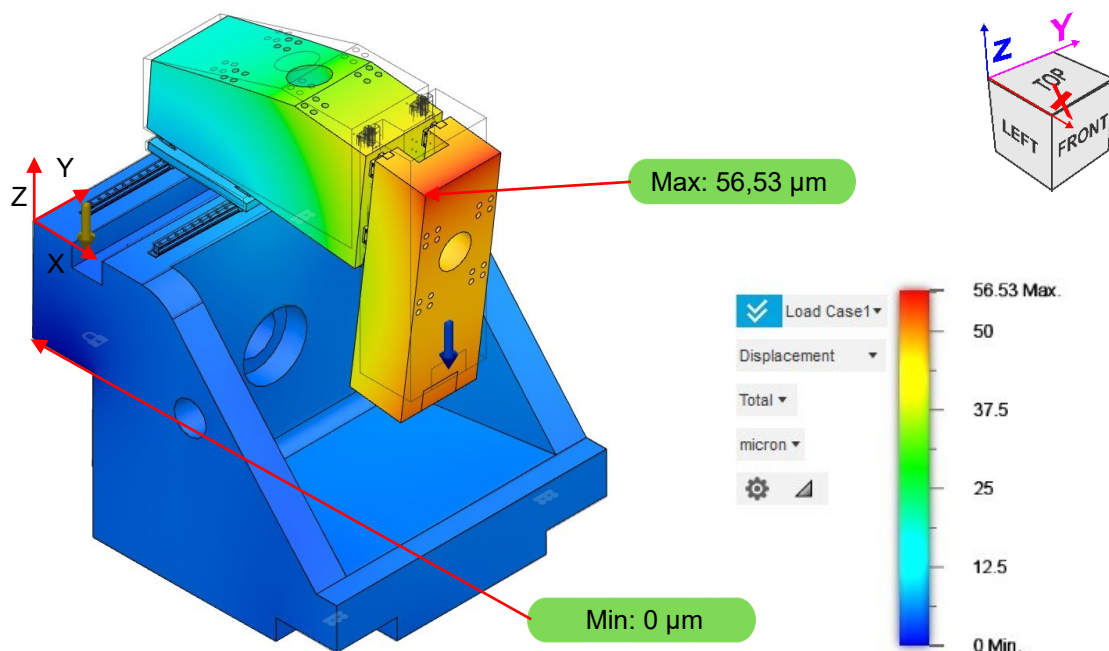
A região de máxima tensão ocorreu na guia esquerda da estrutura X, logo a frente do patim frontal, que foi modelada em aço E51100 e não ultrapassou seu limite de escoamento (1 487 MPa).

Figura 4.12 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção negativa do eixo Z e sob ação da gravidade com resultados das tensões máxima e mínima.



Na Figura 4.13 é mostrada em perspectiva isométrica as deformações da minimáquina. As deformações máxima e mínima foram de 56,53 μm e zero, respectivamente.

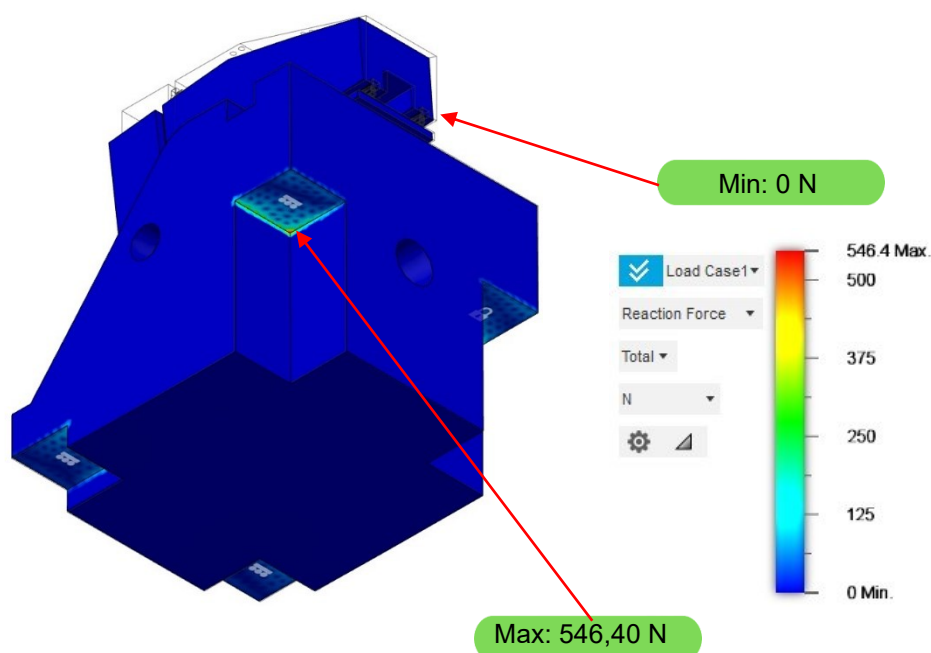
Figura 4.13 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção negativa do eixo Z e sob ação da gravidade com resultados das deformações máxima e mínima.



A máxima deformação foi 56,53 vezes superior ao especificado em projeto de 1 µm.

As forças de reação nos apoios da estrutura base de GS são mostradas na Figura 4.14.

Figura 4.14 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção negativa do eixo Z e sob ação da gravidade com resultados das reações de apoio.



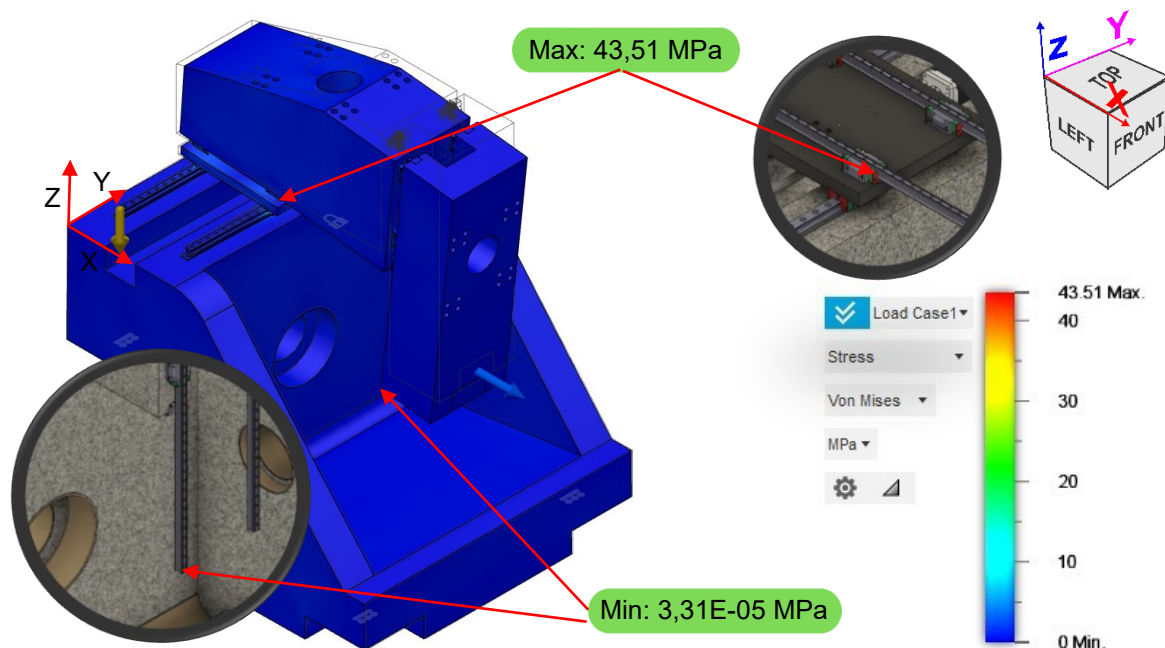
Considerando a força gravitacional, a máxima força da reação de apoio foi de 546,4 N e a mínima zero.

4.1.5 CASO 5

As condições de contorno do engastamento 1, posição 2 e caso 5 resultaram em tensões máxima e mínima de 43,51 MPa e $3,307 \times 10^{-5}$ MPa, respectivamente, conforme apresentado na Figura 4.15.

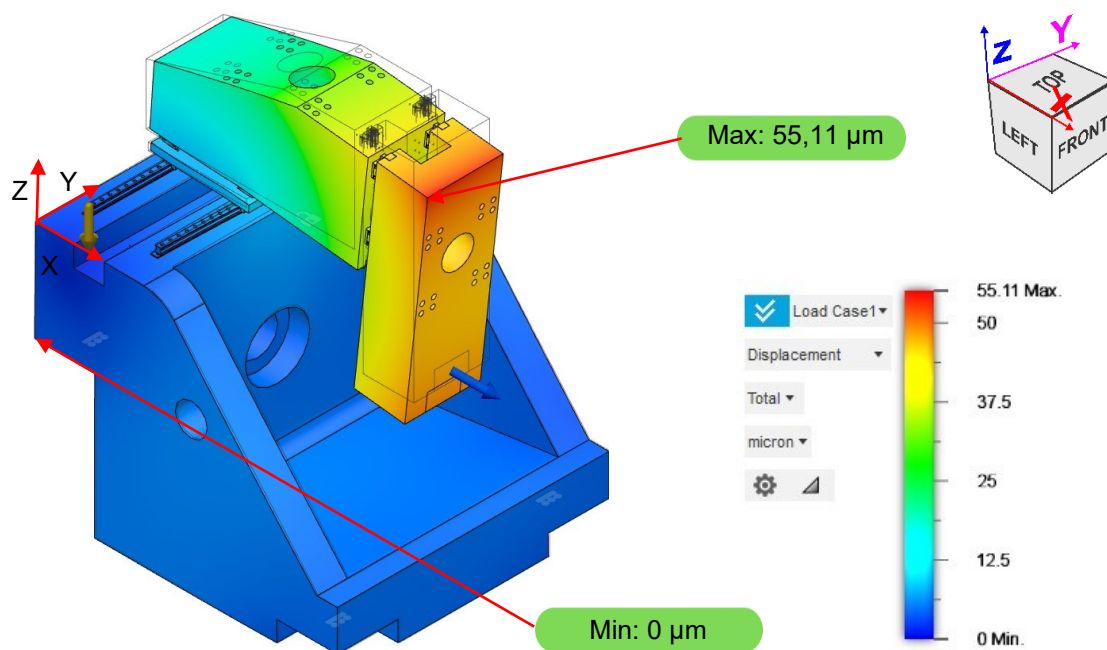
A região de máxima tensão ocorreu na guia esquerda da estrutura X, logo a frente do patim frontal, que foi modelada em aço E51100 e não ultrapassou seu limite de escoamento (1 487 MPa).

Figura 4.15 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força decomposta nos eixos X, Y e - Z, sob ação da gravidade com resultados das tensões máxima e mínima.



Na Figura 4.16 é mostrada em perspectiva isométrica as deformações da minimáquina. As deformações máxima e mínima foram de 55,11 μm e zero, respectivamente.

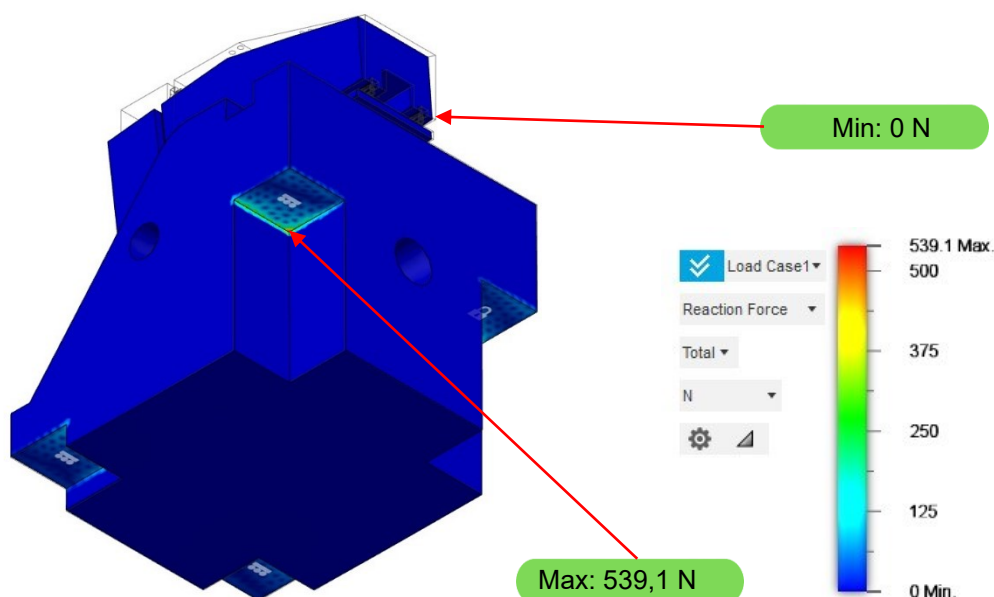
Figura 4.16 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força decomposta nos eixos X, Y e - Z, sob ação da gravidade com resultados das deformações máxima e mínima.



A máxima deformação foi 55,11 vezes superior ao especificado em projeto de 1 μm .

As forças de reação nos apoios da estrutura base de GS são mostradas na Figura 4.17.

Figura 4.17 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 1 e posição 2 submetido a 100 N de força decomposta nos eixos X, Y e - Z, sob ação da gravidade com resultados das reações de apoio.

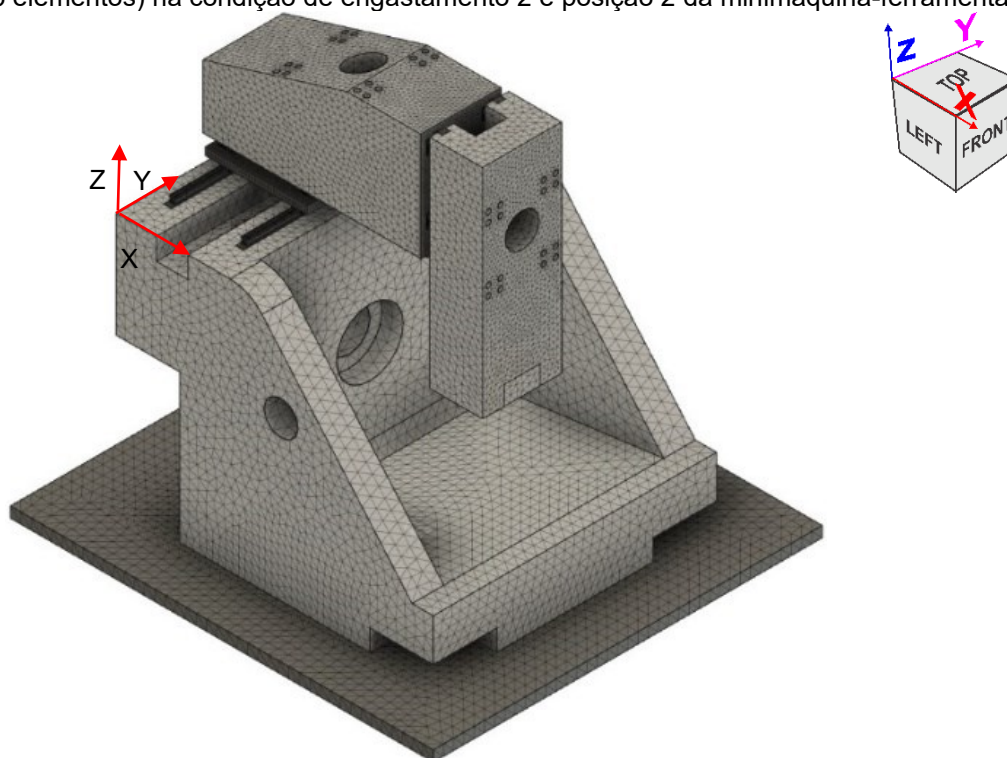


Considerando a força gravitacional, a máxima força da reação de apoio foi de 539,1 N e a mínima zero.

4.2 ENGASTAMENTO 2

A malha de elementos finitos tetraédricos na condição de engastamento 2 e posição 2 apresentou 3 995 329 nós e 2 653 015 elementos (Figura 4.18).

Figura 4.18 - Vista em perspectiva isométrica da malha de elementos finitos tetraédricos (3 995 329 nós e 2 653 015 elementos) na condição de engastamento 2 e posição 2 da minimáquina-ferramenta.

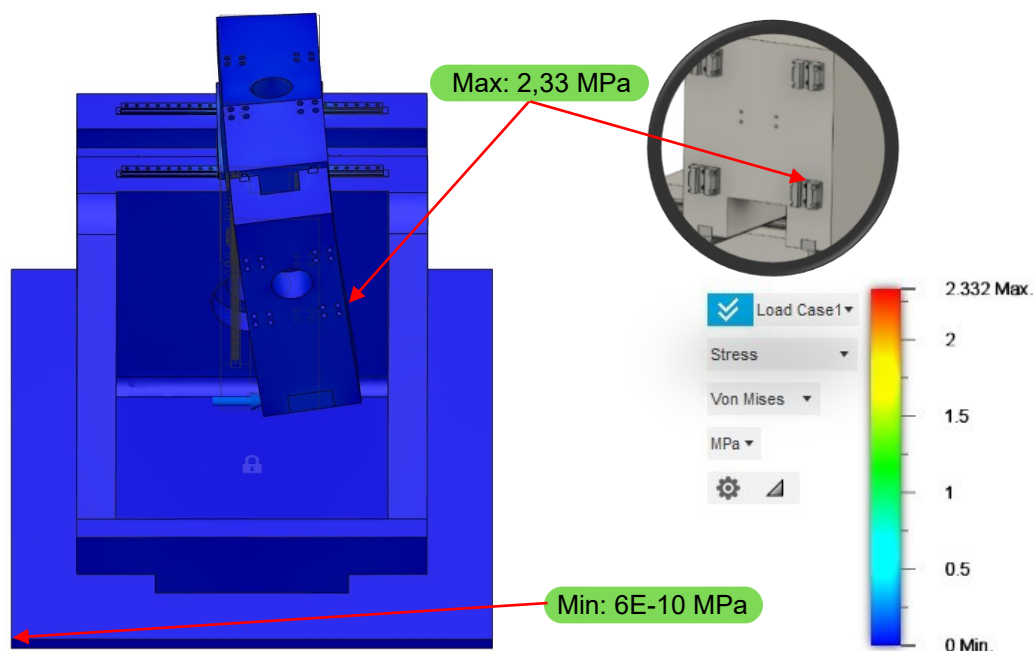


4.2.1 CASO 1

As condições de contorno do engastamento 2, posição 2 e caso 1 resultaram em tensões máxima e mínima de 2,332 MPa e 6×10^{-10} MPa, respectivamente (Figura 4.19).

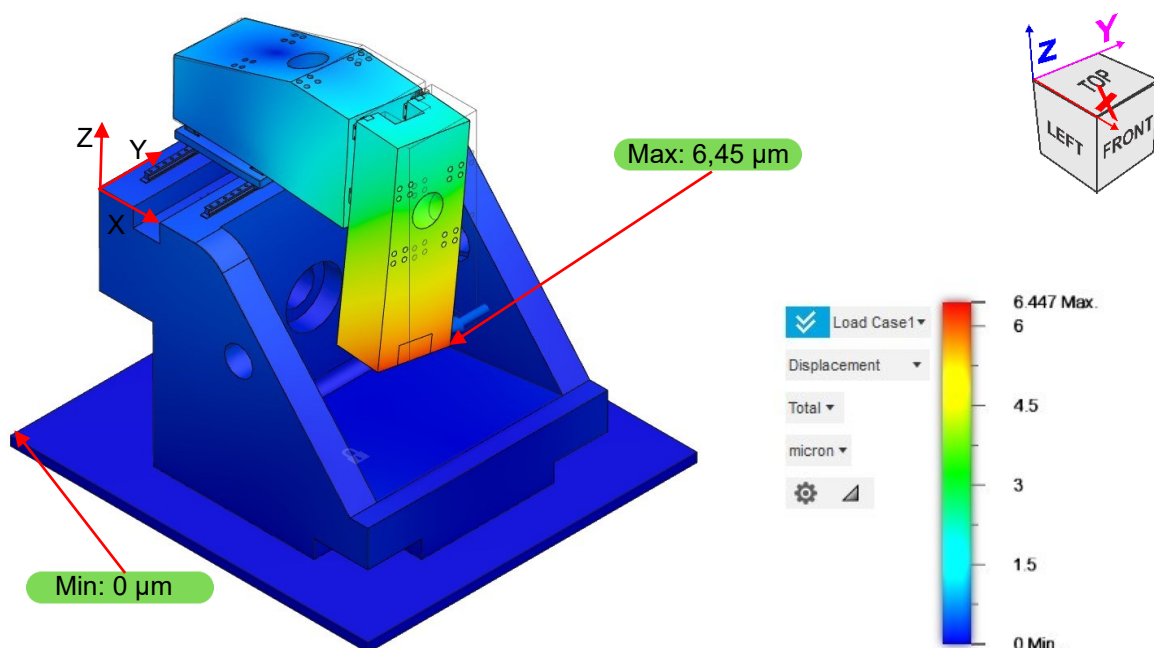
A região de máxima tensão ocorreu no patim inferior direito da Estrutura Z que foi modelada em aço E51100 e não ultrapassou seu limite de escoamento (1 487 MPa).

Figura 4.19 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y com resultados das tensões máxima e mínima.



Na Figura 4.20 é mostrada em perspectiva isométrica as deformações da minimáquina. As deformações máxima e mínima foram de 6,447 μm e zero, respectivamente.

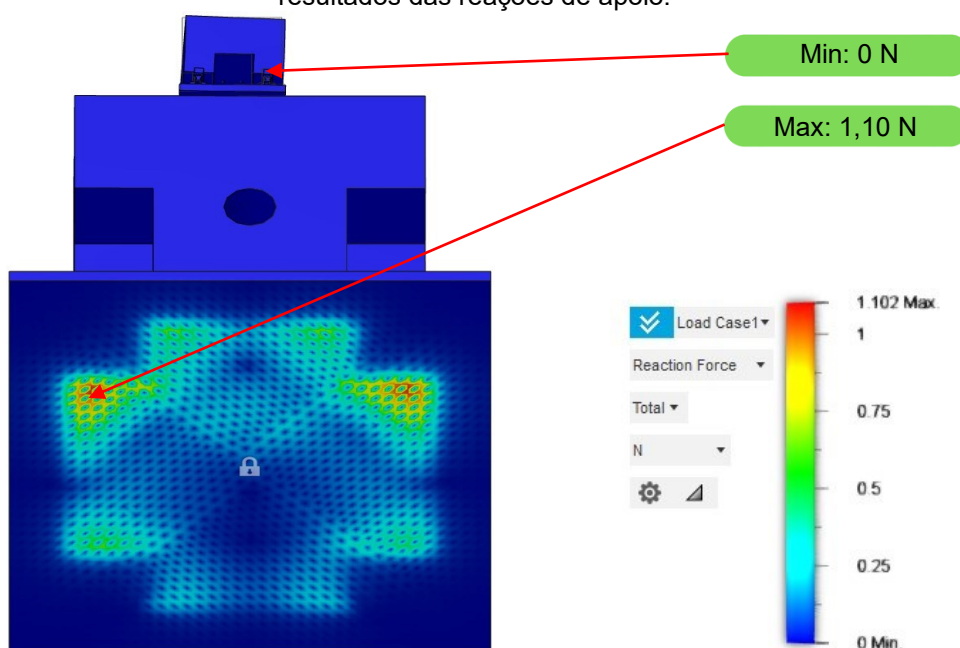
Figura 4.20 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y com resultados das deformações máxima e mínima.



A máxima deformação foi 6,447 vezes superior ao especificado em projeto de 1 μm .

As forças de reação nos apoios da estrutura base de GS são mostradas na Figura 4.21.

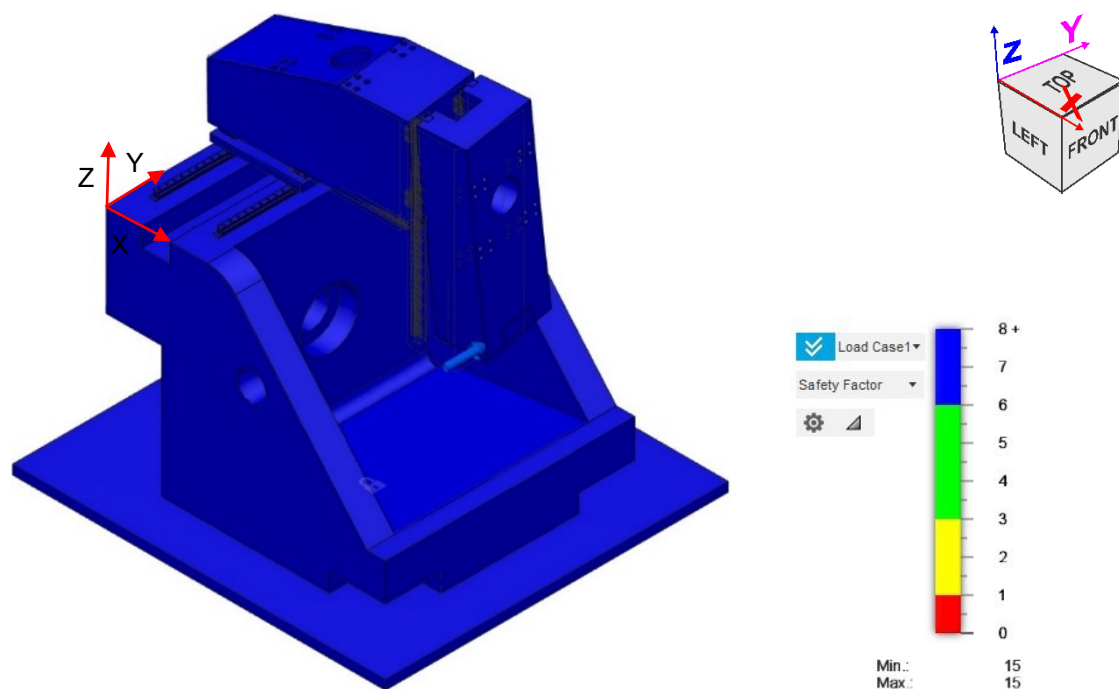
Figura 4.21 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y com resultados das reações de apoio.



Desconsiderando a força gravitacional, a máxima força da reação de apoio foi de 1,102 N e a mínima zero.

Na Figura 4.22 é mostrada a minimáquina em perspectiva isométrica com representação gráfica do fator de segurança. A análise revela que as tensões mecânicas desenvolvidas na estrutura nas condições impostas foram quinze vezes menores que a tensão de escoamento. Os demais casos apresentaram resposta do fator de segurança similares a esta e as respectivas imagens foram suprimidas.

Figura 4.22 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y com resultados do fator de segurança.



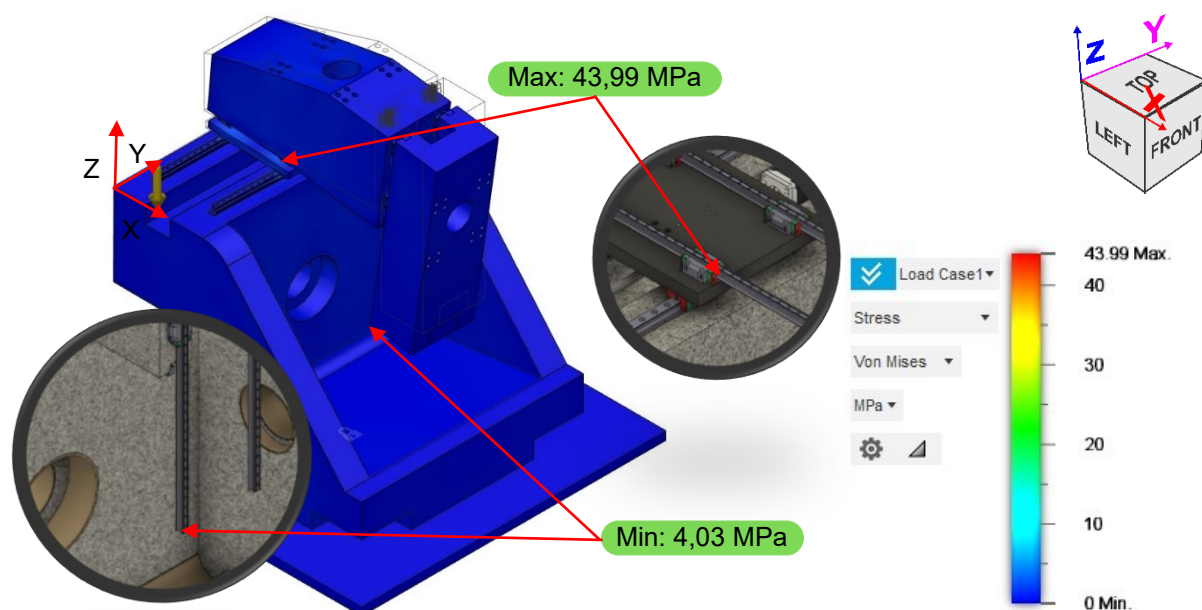
Os resultados apontam que não foram identificadas regiões em que os materiais da máquina poderiam entrar em fase de escoamento devido as cargas estáticas aplicadas.

4.2.2 CASO 2

As condições de contorno do engastamento 2, posição 2 e caso 2 resultaram em tensões máxima e mínima de 43,99 MPa e $4,033 \times 10^{-5}$ MPa, respectivamente, conforme apresentado na Figura 4.23.

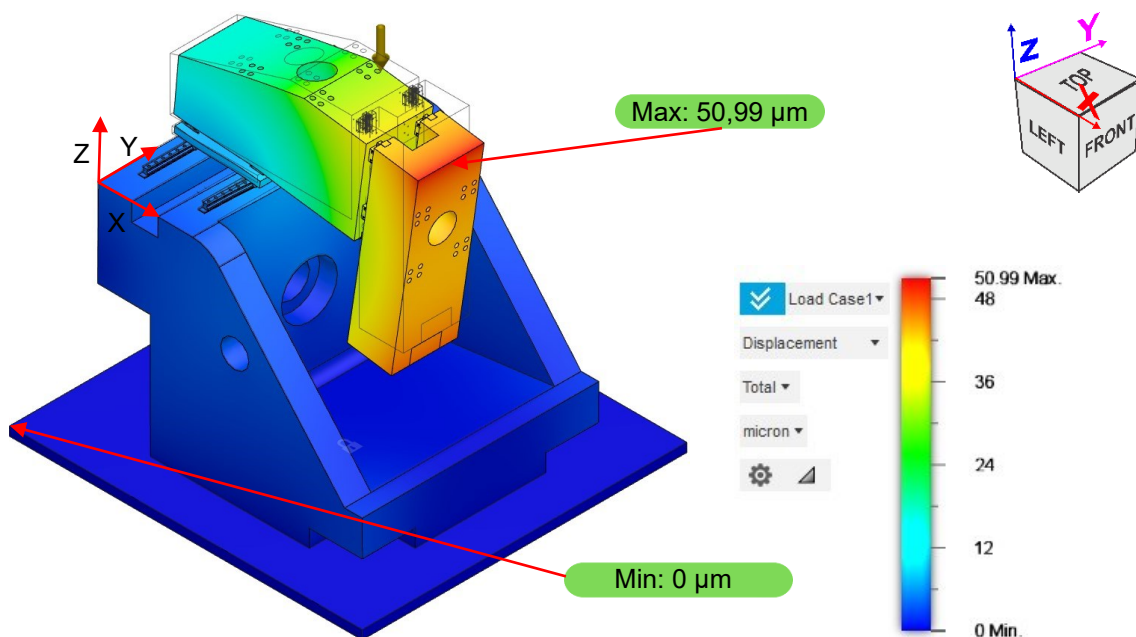
A região de máxima tensão ocorreu na guia esquerda da Estrutura X, logo a frente do patim frontal, que foi modelada em aço E51100 e não ultrapassou seu limite de escoamento (1 487 MPa).

Figura 4.23 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a ação da gravidade com resultados das tensões máxima e mínima.



Na Figura 4.24 é mostrada em perspectiva isométrica as deformações da minimáquina. As deformações máxima e mínima foram de 50,99 μm e zero, respectivamente.

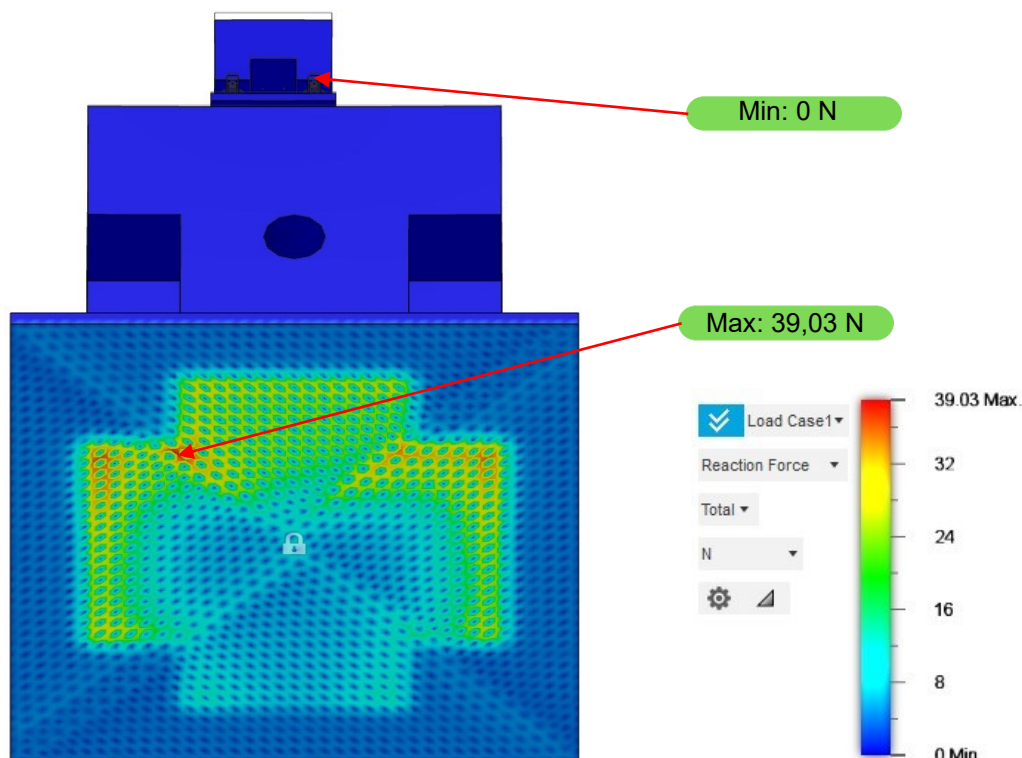
Figura 4.24 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a ação da gravidade com resultados das deformações máxima e mínima.



A máxima deformação foi 50,99 vezes superior ao especificado em projeto de 1 μm .

As forças de reação nos apoios da estrutura base de GS são mostradas na Figura 4.26.

Figura 4.25 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a ação da gravidade com resultados das reações de apoio.



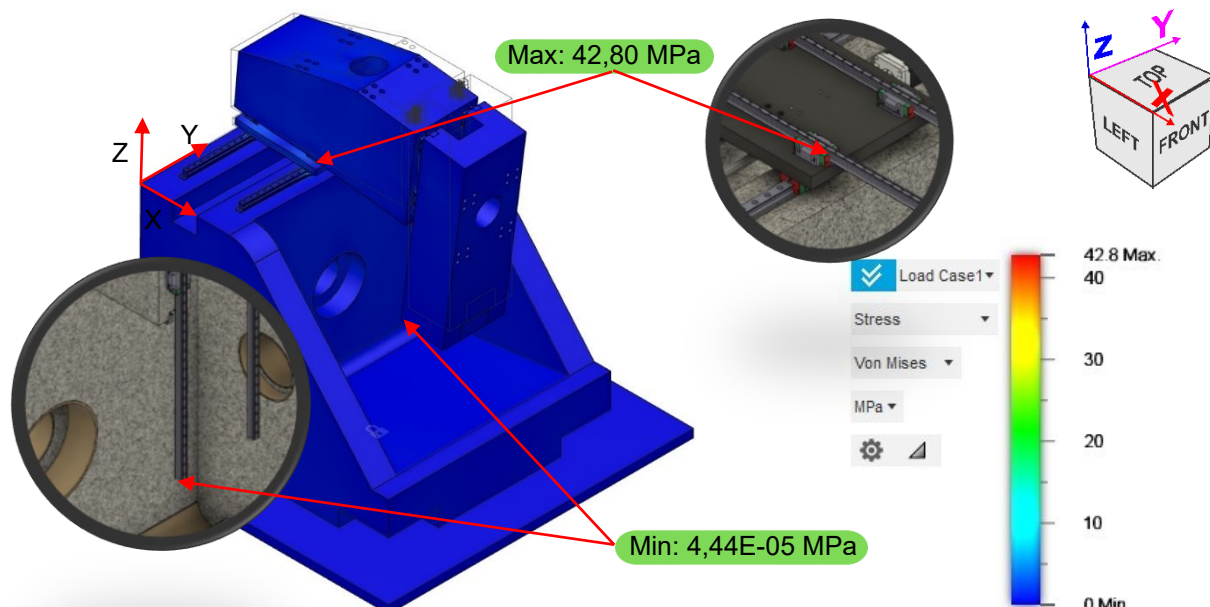
Considerando a força gravitacional, a máxima força da reação de apoio foi de 39,03 N e a mínima zero.

4.2.3 CASO 3

As condições de contorno do engastamento 2, posição 2 e caso 3 resultaram em tensões máxima e mínima de 42,8 MPa e $3,44 \times 10^{-5}$ MPa, respectivamente, conforme apresentado na Figura 4.26.

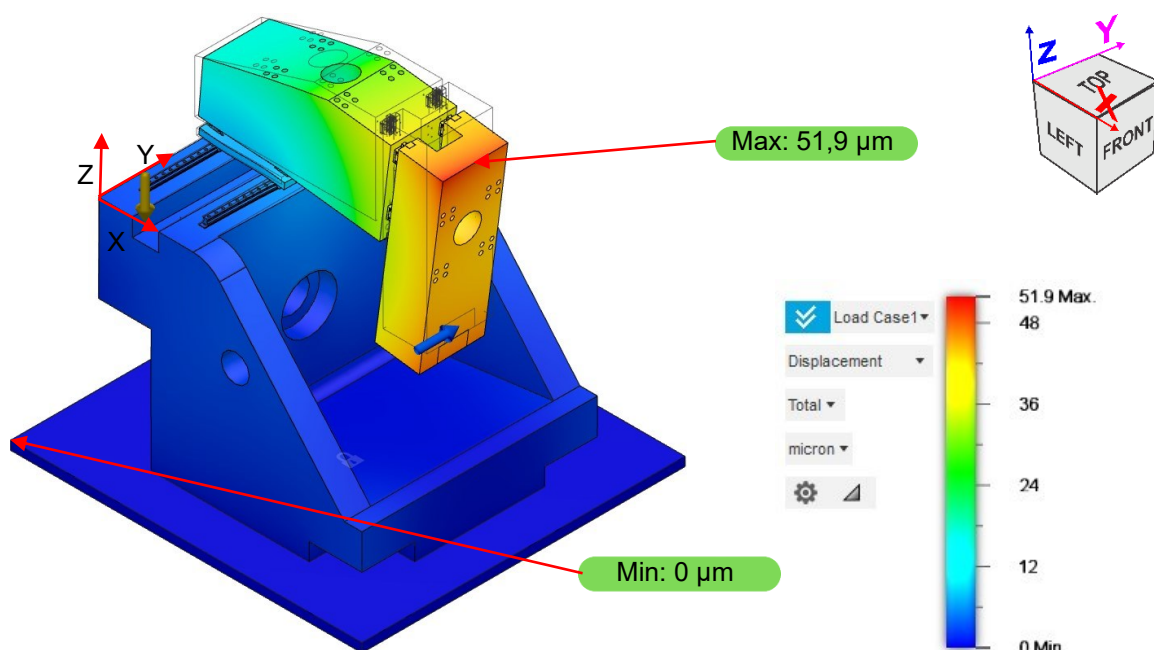
A região de máxima tensão ocorreu na guia esquerda da estrutura X, logo a frente do patim frontal, que foi modelada em aço E51100 e não ultrapassou seu limite de escoamento (1 487 MPa).

Figura 4.26 - Vista em perspectiva isométrica do décimo protótipo da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y e sob ação da gravidade com resultados das tensões máxima e mínima.



Na Figura 4.27 é mostrada em perspectiva isométrica as deformações da minimáquina. As deformações máxima e mínima foram de 51,9 μm e zero, respectivamente.

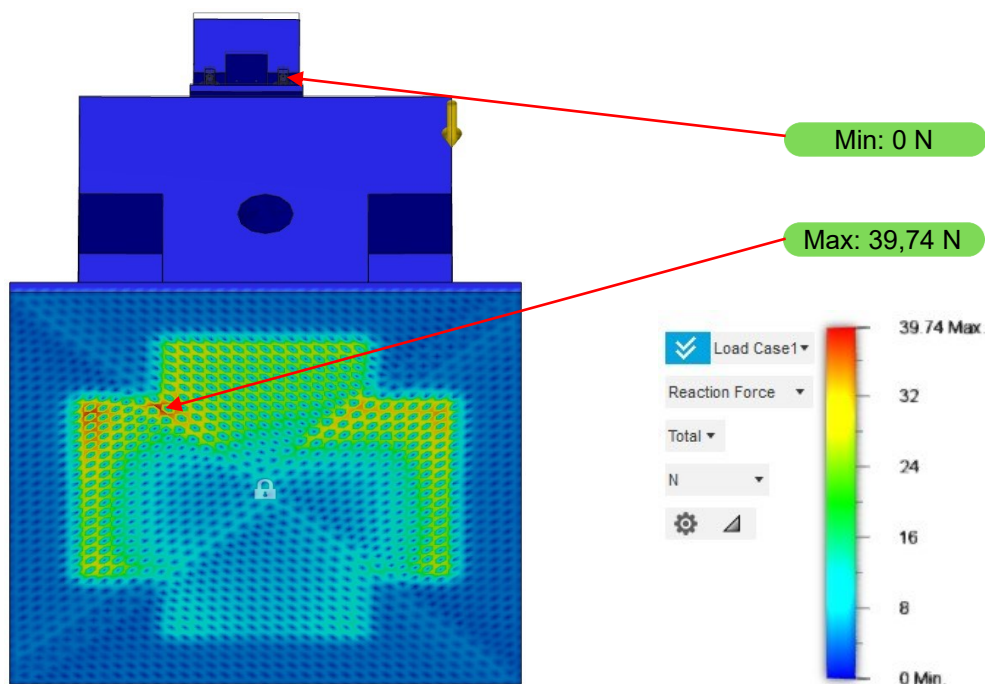
Figura 4.27 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y e sob ação da gravidade com resultados das deformações máxima e mínima.



A máxima deformação foi 51,9 vezes superior ao especificado em projeto de 1 μm .

As forças de reação nos apoios da estrutura base de GS são mostradas na Figura 4.28.

Figura 4.28 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção positiva do eixo Y e sob ação da gravidade com resultados das reações de apoio.



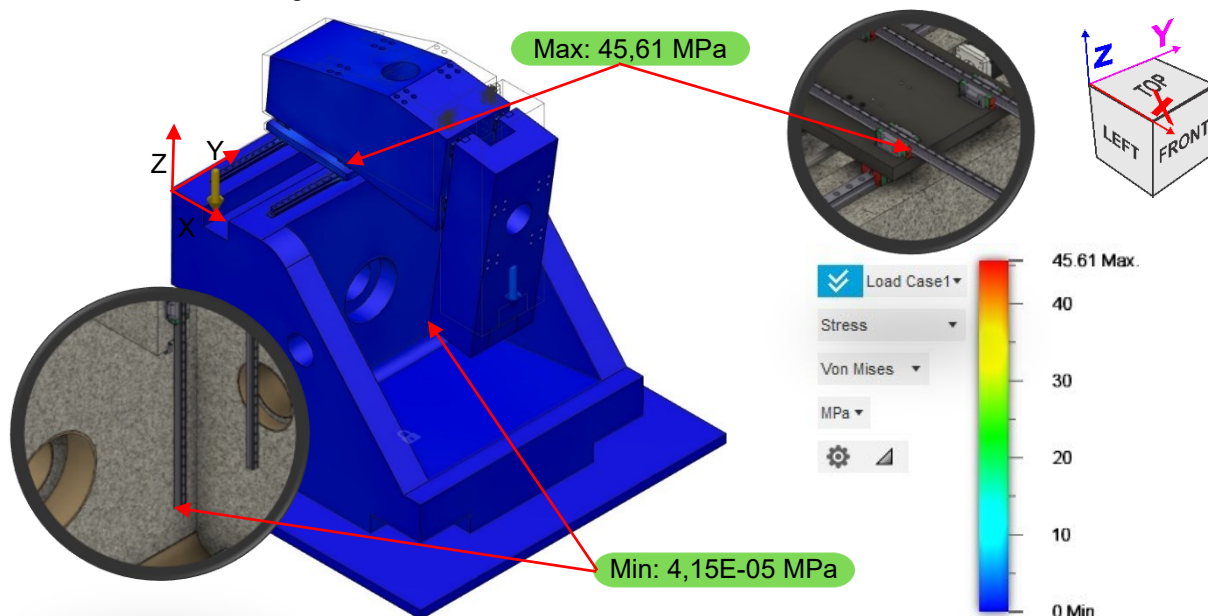
Considerando a força gravitacional, a máxima força da reação de apoio foi de 39,74 N e a mínima zero.

4.2.4 CASO 4

As condições de contorno do engastamento 2, posição 2 e caso 4 resultaram em tensões máxima e mínima de 45,61 MPa e $4,154 \times 10^{-5}$ MPa, respectivamente, conforme apresentado na Figura 4.29.

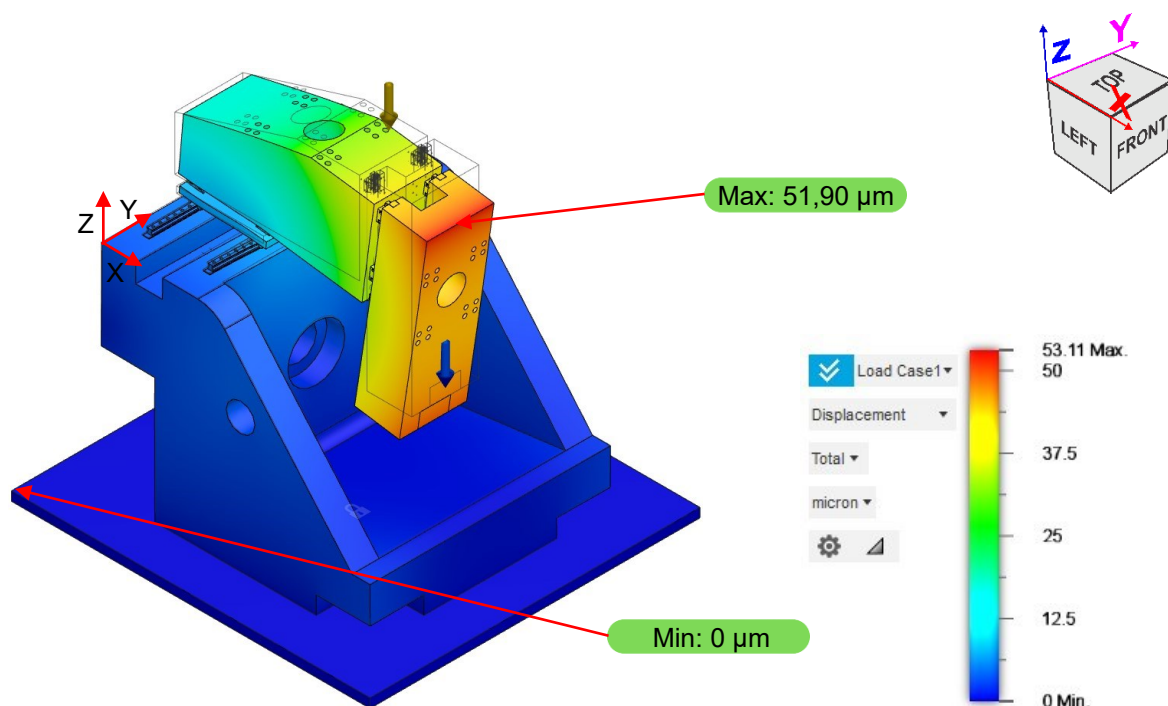
A região de máxima tensão ocorreu na guia esquerda da estrutura X, logo a frente do patim frontal, que foi modelada em aço E51100 e não ultrapassou seu limite de escoamento (1 487 MPa).

Figura 4.29 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção negativa do eixo Z e sob ação da gravidade com resultados das tensões máxima e mínima.



Na Figura 4.31 é mostrada em perspectiva isométrica as deformações da minimáquina. As deformações máxima e mínima foram de 53,11 μm e zero, respectivamente.

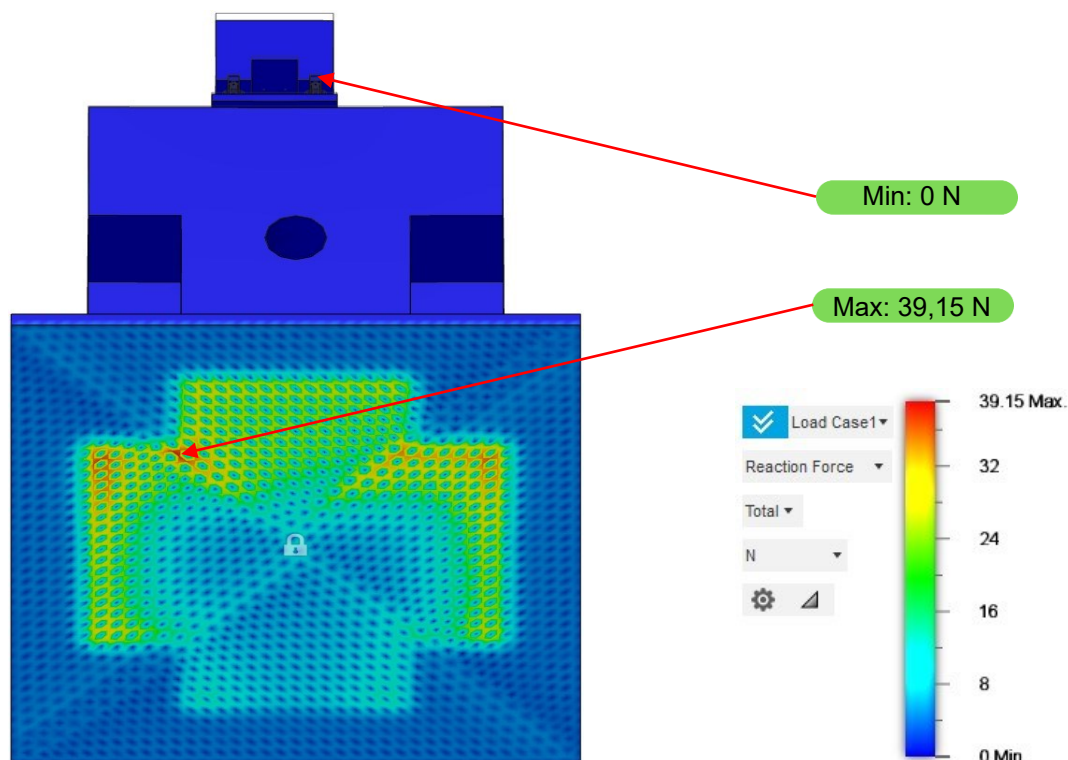
Figura 4.30 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção negativa do eixo Z e sob ação da gravidade com resultados das deformações máxima e mínima.



A máxima deformação foi 56,11 vezes superior ao especificado em projeto de 1 μm .

As forças de reação nos apoios da estrutura base de GS são mostradas na Figura 4.31.

Figura 4.31 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força na direção negativa do eixo Z e sob ação da gravidade com resultados das reações de apoio.



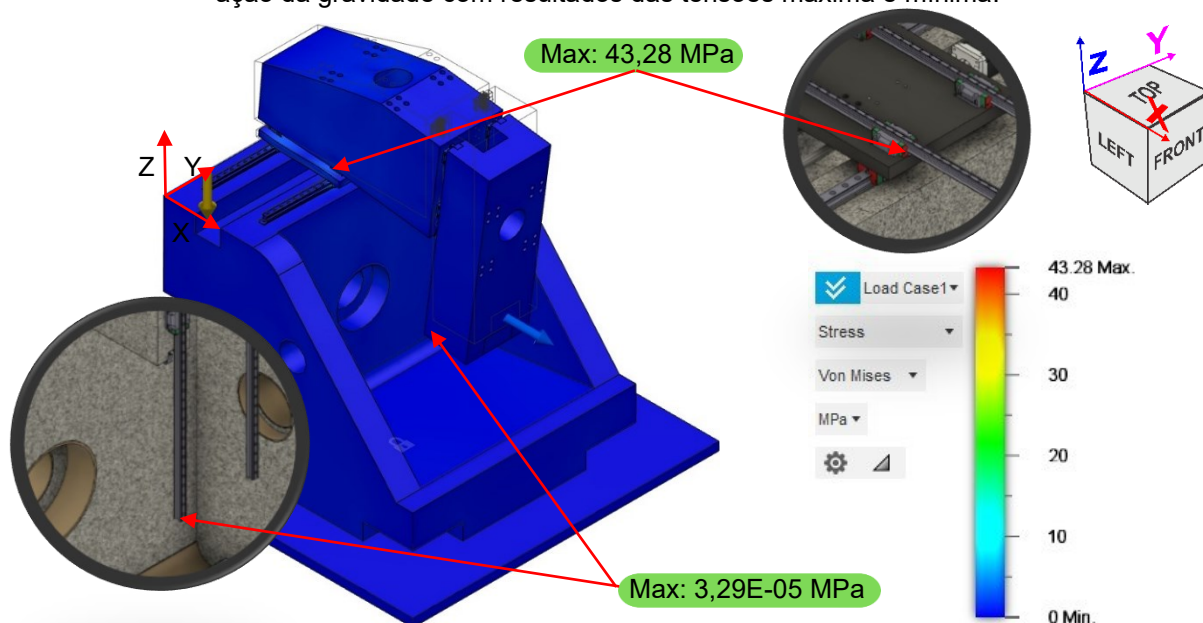
Considerando a força gravitacional, a máxima força da reação de apoio foi de 39,15 N e a mínima zero.

4.2.5 CASO 5

As condições de contorno do engastamento 2, posição 2 e caso 5 resultaram em tensões máxima e mínima de 43,28 MPa e $3,292 \times 10^{-5}$ MPa (Figura 4.32).

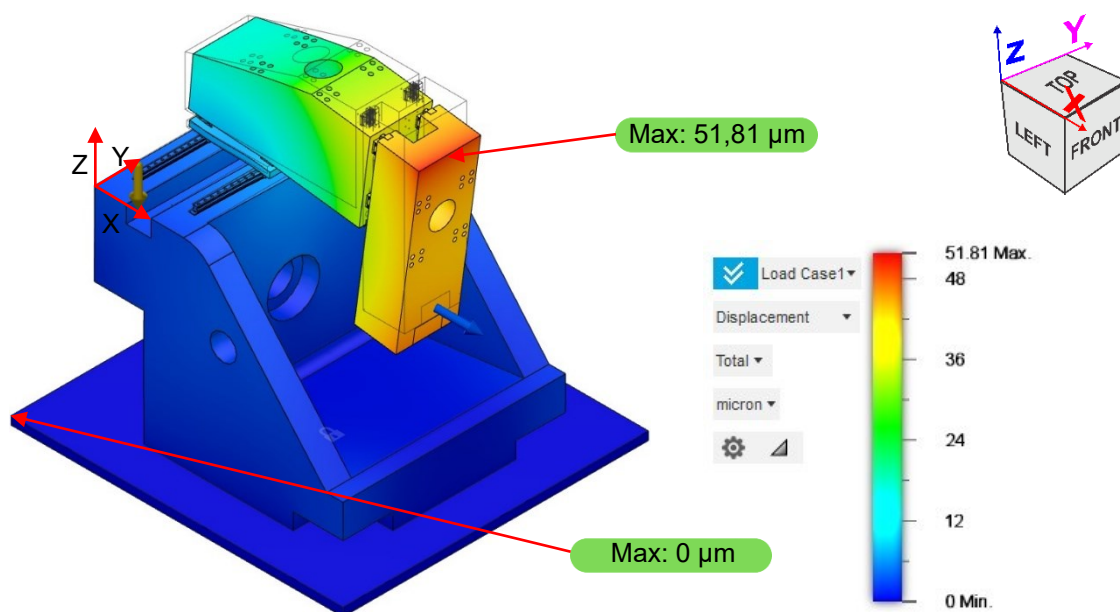
A região de máxima tensão ocorreu na guia esquerda da estrutura X, logo a frente do patim frontal, que foi modelada em aço E51100 e não ultrapassou seu limite de escoamento (1 487 MPa).

Figura 4.32 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força decomposta nos eixos X, Y e -Z, sob ação da gravidade com resultados das tensões máxima e mínima.



Na Figura 4.33 é mostrada em perspectiva isométrica as deformações da minimáquina. As deformações máxima e mínima foram de 51,81 μm e zero, respectivamente.

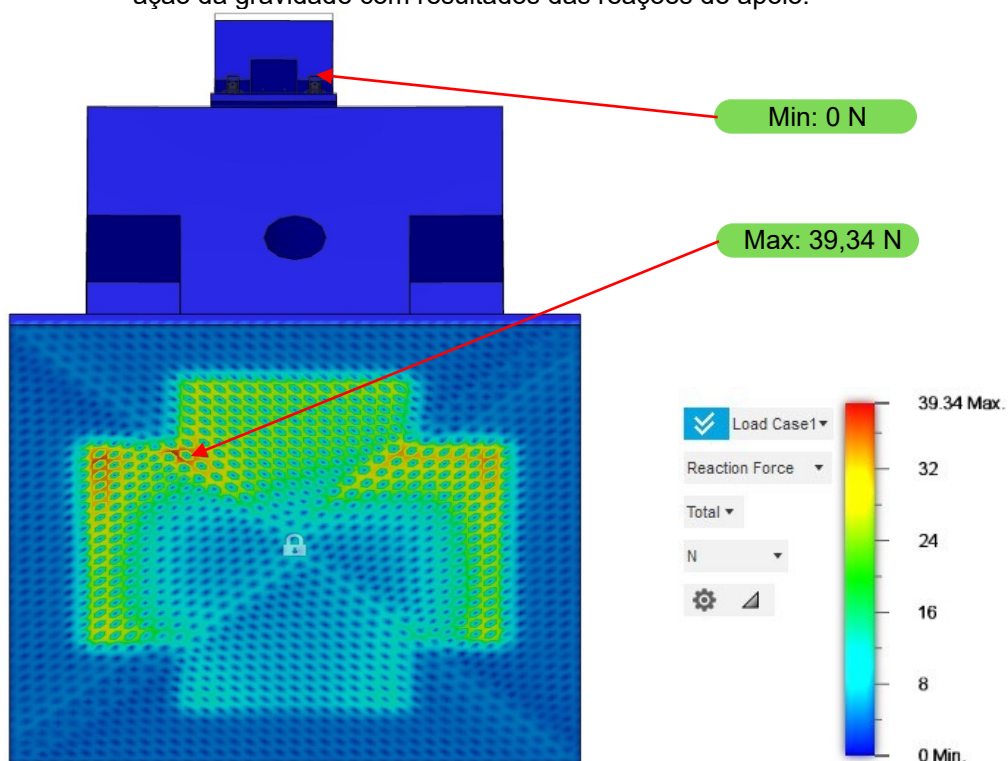
Figura 4.33 - Vista em perspectiva isométrica do protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força decomposta nos eixos X, Y e -Z, sob ação da gravidade com resultados das deformações máxima e mínima.



A máxima deformação foi 51,81 vezes superior ao especificado em projeto de 1 μm .

As forças de reação nos apoios da estrutura base de GS são mostradas na Figura 4.34.

Figura 4.34 - Vista em perspectiva isométrica do Protótipo 10 da minimáquina-ferramenta na condição de engastamento 2 e posição 2 submetido a 100 N de força decomposta nos eixos X, Y e -Z, sob ação da gravidade com resultados das reações de apoio.



Considerando a força gravitacional, a máxima força da reação de apoio foi de 39,26 N e a mínima zero.

4.3 DISCUSSÕES

As discussões do trabalho foram subdivididas em cinco subseções (4.3.1) requisitos do projeto, (4.3.2) software *CAD-CAE-CAM Fusion 360*[®], (4.3.3) protótipos de 1 a 9, (4.3.4) protótipo 10 (4.3.5) granito sintético, (4.3.6) elementos de máquina e (4.3.7) considerações finais.

4.3.1 Requisitos de projeto

A estrutura de GS do tipo portal simétrico se mostrou bastante promissora e foi escolhida com base nos resultados de Rodrigues (2022) que apontou que essa estrutura concilia rigidez, custo de projeto e de fabricação, montagem e manutenção. Através de *Benchmarking* chegou-se na configuração escolhida e ao longo do desenvolvimento do projeto não houve impedimentos tecnológicos que desqualificassem a decisão de projeto.

A geometria baseada na máquina KERN MICRO HD se mostrou adequada por propiciar uma máquina compacta e geometricamente simples com poucos elementos estruturais.

Visando atualizações futuras foram realizadas otimizações dos espaços em todas as estruturas a fim de acomodar todos os novos elementos de máquinas vindouros. Tais espaços não prejudicaram o desempenho nem a função estrutural da minimáquina-ferramenta atual.

O envelope útil de trabalho (400 mm x 400 mm x 400 mm) de projeto, principalmente pela faixa nominal do eixo X, foi o principal requisito de projeto que deve ser revisto, pois ocasionou aumento significativo das dimensões das estruturas, principalmente a estrutura X, trazendo massa extra e, conseqüentemente, deformações maiores que as objetivadas.

A rigidez elástica de laço estrutural de 100 N/ μ m não foi alcançada até o término deste trabalho. Faz-se necessário, portanto, mais ciclos de projeto aliados ao desenvolvimento do GS e suas propriedades mecânicas para otimização de desempenho da minimáquina.

Nos protótipos de 3 a 9 foram considerados geometrias otimizadas a fim de reduzir a massa final da estrutura e a quantidade de material compósito de GS

utilizado em sua fabricação. No protótipo 10, por outro lado, todas as otimizações nesse sentido foram desconsideradas para que fosse analisado o comportamento estrutural da estrutura simplificada.

As técnicas selecionadas para fabricação dos moldes das estruturas de GS, materiais selecionados e as etapas de vazamento e desmoldagem influenciaram a geometria final, resultando em superfícies planas e insertos estratégicos que facilitam a construção e montagem da minimáquina-ferramenta.

A estrutura base ficou mais intrincada dadas as demandas de áreas de suporte/apoio, escoamento de fluidos e resíduos de processo e superfícies funcionais para atualizações futuras (quarto e quinto eixos, cabeçote de torneamento, contra ponta). Ela necessitará de um molde mais elaborado que as demais partes de GS.

Para um primeiro ciclo de projeto os diâmetros dos fusos de esferas recirculantes foram selecionados de acordo com a recomendação do fabricante. Sua instalação na minimáquina-ferramenta ocorrerá através de mancais que estarão montados sob espaçadores. Quando removidos esses espaçadores será possível instalar motores e *encoders* lineares.

As guias lineares foram selecionadas nessa primeira fase através da experiência do grupo e recomendações de catálogos, ficando o dimensionamento completo para trabalhos futuros após finalização do projeto estrutural. Os espaços previstos para futuros mancais aerostáticos também foram contemplados e não foram empecilhos para o sucesso do primeiro ciclo de projeto.

Apesar das informações disponíveis na literatura sobre o GS terem possibilitado análises de elementos finitos e orientações do comportamento geral da minimáquina-ferramenta nesta pesquisa, não há garantia do desempenho do GS real que será fabricado. Dessa forma, as pesquisas futuras deverão considerar diferentes formulações e caracterização de propriedades do GS para conhecer o material de projeto e validar os modelos de análises estáticas e dinâmicas de desempenhos estruturais.

Nesta pesquisa o SP foi considerado como um corpo ideal e engastado na estrutura Z. Tal critério de projeto reduziu o tempo de desenho, montagem e simulação da estrutura da minimáquina-ferramenta.

A análise realizada sob a minimáquina-ferramenta aconteceu prevendo o engastamento nos seus pontos de fixação e com ela sobre uma superfície plana.

A Simulação das forças gravitacionais atuando sobre a minimáquina-ferramenta trouxeram clareza no comportamento da estrutura e os pontos necessários de otimização da máquina.

4.3.2 Fusion 360®

O projeto foi realizado por meio da parceria da Autodesk® com as universidades com a licença do *software* Fusion 360® fornecido de forma gratuita e completa. As simulações computacionais foram feitas em nuvem na rede de supercomputadores da Autodesk®, trazendo agilidade no processo de simulação computacional, não demandando computadores locais de alto desempenho.

O Fusion 360® é um *software* que permite os usuários se conectarem aos seus projetos e dados de qualquer local que tenha conexão de *internet*. Também permite colaboração e atualização em tempo real com membros de equipes formadas dentro do programa. Está disponível para diversos sistemas operacionais.

É um *software* bastante versátil que pode lidar com várias necessidades de projeto e manufatura. Ele possui grupos de ferramentas integradas muito interessantes que permitem ao usuário criar, simular, renderizar e animar modelos 3D. Soma-se ainda as ferramentas de auxílio a manufatura (*Computer Aided Manufacturing - CAM*).

Ele possui interface amigável, de fácil aprendizado e com muita informação gratuita na *internet*, tanto em canais oficiais quanto de terceiros. Destaca-se a facilidade de uso e por isso tem uma curva de aprendizado bastante íngreme, possibilitando conciliar o aprendizado do *software* com a evolução do projeto.

Apesar dos pontos positivos o *software* possui algumas limitações que podem afetar alguns usuários. Demanda uma conexão de *internet* estável para funcionar corretamente. O modo *offline* é bastante limitado.

É um *software* limitado a poucos formatos de arquivos se comparado a outros softwares CAD-CAE-CAM.

O aprendizado do *software* aconteceu de forma rápida e dinâmica. Durante os protótipos 1 a 3 foi realizado uma adaptação ao seu uso, pois o autor era familiarizado com o *software* SolidWorks®. A qualidade das informações disponíveis gratuitamente foi determinante para o rápido aprendizado e consequente uso da ferramenta.

Com a possibilidade de trabalhar de forma cooperativa e *online*, o *software* possibilitou o avanço do projeto em atividades remotas.

A simulação em nuvem possibilitou o avanço rápido da análise estrutural da minimáquina-ferramenta e não seria possível de se fazer caso houvesse a necessidade de uso de *hardware* local.

A qualidade das imagens e de detalhamento de projeto possibilitou uma visualização precisa e ajudou no entendimento espacial da minimáquina-ferramenta.

O Fusion 360® é uma plataforma computacional completa de *CAD-CAE-CAM* para os principais processos aditivos e subtrativos. Porém, não permite o planejamento de processos híbridos de manufatura, por exemplo integração da manufatura aditiva com a subtrativa. Espera-se que futuramente novas funcionalidades sejam disponibilizadas para atender essa demanda e que o *software* possa ser associado as multifuncionalidades da minimáquina-multifuncional proposta nesta pesquisa.

4.3.3 Protótipos 1 a 9

Os protótipos contribuíram para concretizar metas de aprendizado, tanto por parte do autor, quanto de entendimento espacial de todos os elementos mecânicos, assim como a forma geral das estruturas, desafios de fabricação, montagem, manutenção e operação da minimáquina-ferramenta.

O protótipo 1 trouxe uma visão tridimensional do esboço proposto pra minimáquina-ferramenta e propiciou o entendimento do *software*. Com ele foi possível aprender sobre como criar formas geométricas tridimensionais, adicionar juntas, realizar os primeiros movimentos do esboço, linha do tempo e todo o básico de desenho mecânico dentro do Fusion 360®.

O protótipo 2 foi uma evolução no aprendizado do uso do *software*, sendo fundamental para importar objetos em 3D de bancos de dados dos fabricantes de elementos de máquinas (por exemplo, HIWIN e MECTROL). Fez-se uma evolução nas formas geométricas da máquina, principalmente da estrutura X. A estrutura base teve em sua forma a adição de espaços para um futuro quarto e quinto eixos. A estrutura X foi pensada na forma utilizada pela Kern Micro HD. E a estrutura Z foi idealizada com massa reduzida. Em todas as estruturas foram deixados espaços

maiores para acomodar as unidades de potência e sistemas lineares. Foram estudadas as técnicas de montagem visando aumentar a rigidez dos sistemas lineares e replicadas no desenho.

O protótipo 3 trouxe a decisão do diâmetro dos fusos utilizado nos projetos subsequentes. Foram adicionados os modelos de motores eletromagnéticos padrão *NEMA 34* e os suportes de fixação deles nas estruturas. Todas as dimensões da máquina foram ajustadas, assim como o comprimento das guias, para que as estruturas ficassem mais robustas e os eixos atendessem a faixa nominal determinada pelos requisitos de projeto.

O detalhamento do projeto começou de fato nessa fase. Foram adicionados todos os furos que fixam as guias na estrutura, flanges de suporte do SP, posicionamento dos patins para que seus bicos de lubrificação ficassem acessíveis no momento da manutenção da máquina, acessos de montagem dos parafusos dos patins. O desenho da minimáquina-ferramenta foi pensado de forma a se tornar viável sua montagem.

Os primeiros estudos de posição do CG geométrico da máquina foram realizados visando reduzir os momentos e deformações estruturais. Foram avaliadas duas formas de manipular o CG da estrutura X, a decisão final ficou na adição de vazios cilíndricos horizontais. A facilidade construtiva através de tubos de *PVC* comerciais foi fator determinante para essa decisão.

O protótipo 4 teve o objetivo de testar os limites de alívio de massa nas estruturas X e Z, onde foi averiguado o quanto da massa removida afetaria o posicionamento do CG. Mesmo com a remoção localizada de material o posicionamento do CG pouco se alterou, demonstrando assim, que apesar de uma estratégia inteligente não deverá ser a única adotada no momento do design final da minimáquina-ferramenta. As estruturas X e Z foram alvos do alívio de massa e do estudo do posicionamento do CG. Nessa fase, todas estruturas ganharam rebaixos visando a facilidade e possibilidade da montagem da minimáquina-ferramenta. Detalhou-se também a porca do fuso da estrutura Z.

O protótipo 5 recebeu elementos de máquinas mais precisos. Foi feita uma melhoria no detalhamento introduzindo-se insertos metálicos nas estruturas com função de montagem e alinhamento das guias lineares. Foram adicionados detalhes das ancoragens e dos parafusos. Nesse ponto com o domínio da ferramenta Fusion

360[®] e com a ideia geral da máquina bem consolidada novas ideias foram definidas para o próximo protótipo.

O protótipo 6 teve suas dimensões alteradas, principalmente da estrutura base. O objetivo dessas alterações foi afastar as guias lineares das bordas das estruturas para melhorar o ancoramento dos insertos no GS. Fez-se um estudo de acessos de montagem para avaliar a viabilidade de construção da minimáquina-ferramenta.

O protótipo 7 não sofreu alterações significativas na estrutura. O flange XY foi simplificado e buscou-se dois modelos de patins que possuísem o mesmo padrão de furação quando montados de forma oposta e perpendicular o que possibilitou que o conjunto utilizasse os mesmos parafusos em sua montagem. Assim, o flange XY necessitaria de menos furos e o erro de posicionamento seria menor, melhorando as tolerâncias de montagem. Entretanto, a ideia foi descartada por falta de produtos que atendessem essa demanda. Seria necessário usar um dos patins para ajustar o posicionamento dos furos. Também foi observado que se o projeto adotasse essa solução, então os ajustes de montagem seriam comprometidos devido a necessidade de ajustes simultâneos das geometrias dos eixos X e Y.

O protótipo 8 apresentou evoluções geométricas e de seleção de materiais. O flange XY bem como os suportes das guias foram pensados para ser confeccionados a partir de chapas de aço laminadas a frio de *AISI* 1045 por meio de processos convencionais de usinagem. Mais detalhes foram introduzidos, incluindo furos e roscas visando a montagem por meio de parafusos dos elementos e subsistemas. Acessos de montagem das porcas dos fusos foram introduzidos. Os acessos aos patins também sofreram alterações.

O protótipo 9 refinou o protótipo anterior e os acessos para parafusos e outros elementos de máquina foram considerados para serem moldados com a ajuda de tubulação comercial de *PVC* que seriam fundidas às estruturas. Assim, simplificando a fabricação dos moldes, moldagem, desmoldagem e montagem da minimáquina.

4.3.4 Protótipo 10

O protótipo 10 representa a proposta final. Ele não contemplou alívios de massa e os acessos para montagem da máquina foram definidos considerando simplicidade e redução de custo de fabricação. A estrutura base foi drasticamente melhorada,

incluindo os apoios para os suportes e amortecedores de vibração. Foram novamente introduzidas as superfícies para futuras adições dos quarto e quinto eixos. Também foi introduzida a cuba coletora de resíduos de processo.

Uma das vantagens em relação as estruturas bases dos outros protótipos reside na maior estabilidade dinâmica dado os suportes estarem localizados mais próximos ao centro de massa da máquina, diminuindo, portanto, as acelerações e deslocamentos da estrutura durante a inversão dos movimentos de processo.

A massa final da estrutura de GS foi de 2 574 Kg e será futuramente otimizada para reduzir a quantidade de material para facilitar a fabricação, montagem e transporte, sem comprometer o desempenho da minimáquina.

O design embora favorável ao desempenho mecânico e funcional, com geometria visualmente agradável e ergonômica, apresenta desafios de fabricação e montagem.

Como uma primeira proposta detalhada da minimáquina-ferramenta, o protótipo 10 alcançou a maioria dos requisitos de projeto almejados, a saber, estrutura de GS, volume de trabalho, espaços suficientes para atualizações futuras, forma condizente com o proposto (principalmente no que tange a estrutura portal simétrica), detalhamento de elementos de máquinas baseado em modelos reais possibilitando uma visão geral do espaço ocupado por cada componente e um estudo primário das deformações geradas pela ação da gravidade e de forças de usinagem.

A última versão apresenta todos os elementos mecânicos e os motores elétricos com cores e texturas dos materiais definidos.

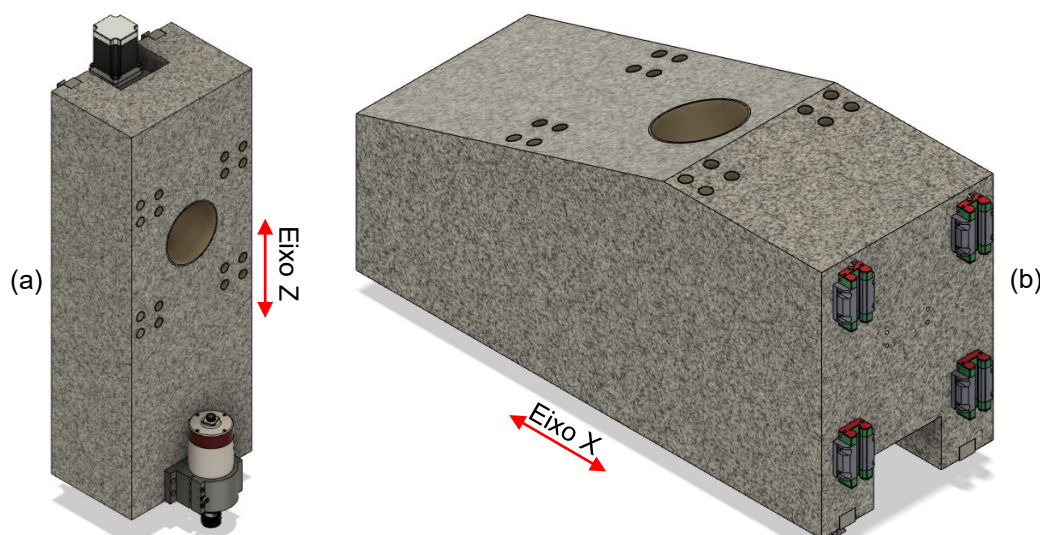
Todas as condições avaliadas ocasionaram tensões mecânicas inferiores aos limites de escoamento dos respectivos materiais de projeto aplicados às estruturas. Entretanto, as deformações estruturais máximas foram superiores a deformação máxima considerada em projeto de 1 μm , conforme os resultados resumidos apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resultados gerais das simulações computacionais em função das condições de contorno.

Engastamento	Posição	Caso	Módulo da força (N)	Direção e sentido	Tensão máxima (MPa)	Deformação máxima (μm)
Tipo 1	1 (Estrutura X retraída)	1	100	Y	1,82	2,24
		2	0	Não se aplica	11,09	6,26
		3	100	Y	11,53	6,94
		4	100	- Z	11,84	7,06
		5	100	X; Y; - Z	10,86	5,95
	2 (Estrutura X expandida)	1	100	Y	2,33	7,00
		2	0	Não se aplica	44,19	54,47
		3	100	Y	43,00	55,44
		4	100	- Z	45,81	56,53
		5	100	X; Y; - Z	43,51	55,11
Tipo 2	1 (Estrutura X retraída)	1	100	Y	2,13	2,86
		2	0	Não se aplica	13,41	8,04
		3	100	Y	14,02	8,63
		4	100	- Z	14,32	9,21
		5	100	X; Y; - Z	13,16	7,29
	2 (Estrutura X expandida)	1	100	Y	2,33	6,45
		2	0	Não se aplica	43,99	50,99
		3	100	Y	42,80	51,90
		4	100	- Z	45,61	53,11
		5	100	X; Y; - Z	43,28	51,81

As maiores deformações advêm do efeito gravitacional imposto a estrutura, principalmente das estruturas Z (Figura 4.35a) e X (Figura 4.35b).

Figura 4.35 - Vista em perspectiva isométrica da (a) estrutura Z e (b) estrutura X.



Quando foi considerada a ação da gravidade na estrutura, os níveis de deformação para condições de posicionamento e engastamento semelhantes não

variaram de forma significativa (menor que 2,5 %), independentemente da direção e sentido da força de usinagem aplicada.

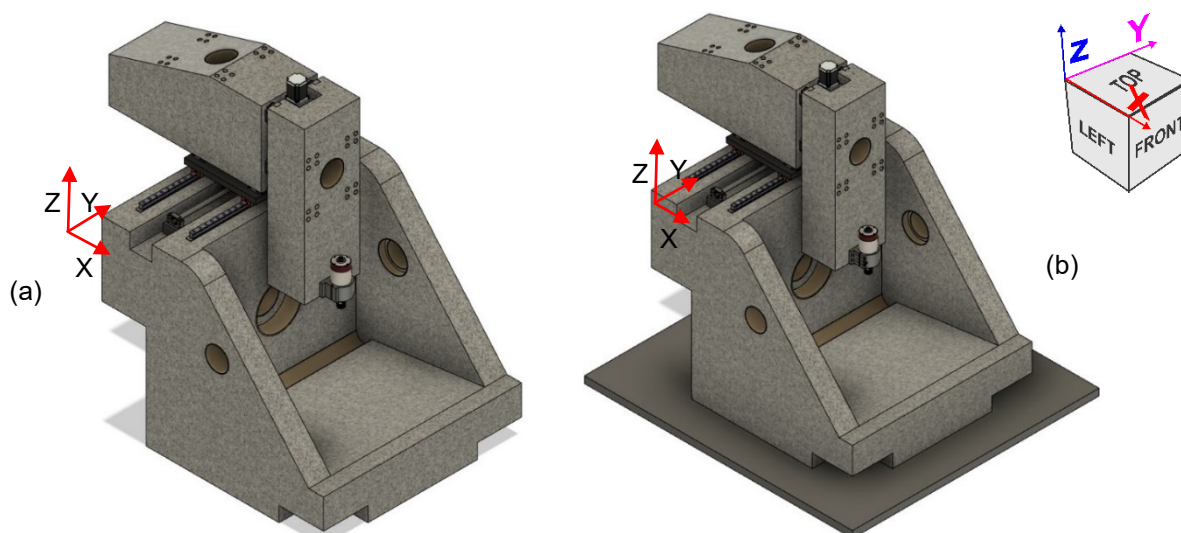
Foi observado que as deformações causadas pela ação da gravidade foram aproximadamente constantes. Com essa previsibilidade de comportamento da estrutura da minimáquina-ferramenta fica possível contornar os erros de posicionamento do SP ainda em fase de projeto. Durante a montagem e alinhamento geométrico da minimáquina-ferramenta consegue-se mensurar os valores dos erros e, conseqüentemente, realizar ação mitigadoras mecânicas e de programação no *software* da minimáquina-ferramenta.

Outra forma de atenuar possíveis erros provindo dessa condição de comportamento estrutural é realizar a usinagem da mesa de fixação na própria minimáquina-ferramenta após a sua montagem. A criação de um sistema de contrapesos pode ser considerada também a fim de diminuir a deformação da estrutura X. Raksiri e Parnichkun (2004) implementaram esse sistema em uma máquina CNC de três eixos de modelo ARD-TB400.

Foi observado que para a condição de engastamento 2 e posição 2 (Figura 4.18) as deformações foram em torno de 6 % menores quando comparadas com as deformações para a condição de engastamento 1 e posição 2 (Figura 4.1).

Quando foram comparadas as deformações para a condição de engastamento 1 e posição 1 (Figura 4.36a), as deformações foram aproximadamente 20 % menores que as deformações para a condição de engastamento 2 e posição 1 (Figura 4.36b).

Figura 4.36 - Vista em perspectiva isométrica da minimáquina-ferramenta em (a) condição de engastamento 1 e posição 1 e (b) condição de engastamento 2 e posição 1.



4.3.5 Granito sintético

Houve uma relativa dificuldade em reunir informações sobre as propriedades mecânicas do GS na literatura. Apesar das adversidades foi possível obter dados que possibilitaram o seu uso nas análises de elementos finitos. Porém, a composição geral do material foi pouco encontrada devido ao grande interesse industrial sobre o tema e, conseqüentemente, ao sigilo industrial.

A fim de obter dados concretos e propriedades mecânicas que suprem todas as necessidades de projeto, faz-se necessário ensaios experimentais com formulações distintas que compõem o GS. Tais dados são de suma importância para aprimorar o modelo de elementos finitos da minimáquina-ferramenta proposta e garantir a otimização estrutural.

Para a fabricação do GS faz-se necessário estabelecer granulações de dimensões heterogêneas que aumentarão ao máximo a compactação dos agregados, garantindo, assim, maior densidade final, menor geração de defeitos internos e propriedades mecânicas condizentes as encontradas na literatura.

Com as granulações otimizadas, a escolha da resina epóxi, que promoverá maior molhabilidade de todo agregado usado, garantirá após a cura a estabilidade química e as propriedades mecânicas previstas na literatura.

A seguir apresenta-se um guia com as etapas de fabricação do GS organizados a partir da literatura:

- Seleção dos agregados nas dimensões determinadas e em quantidades definidas (pelo menos 3 granulometrias para maximizar a compactação);
- Mistura dos agregados secos e limpos – reservar no recipiente A;
- Catálise da resina epóxi (resina + catalisador) respeitando a proporção mássica agregado/resina. Trocar a resina de recipiente mais de uma vez para homogeneizar a mistura – reservar no recipiente B;
- Caldear agregado e resina (vazar conteúdo de B em A);
- Vazamento no molde já montado e devidamente tratado com desmoldante e com insertos e superfícies funcionais posicionadas;
- Vibrar o molde para compactar o compósito;
- Aguardar cura; e
- Desmoldagem.

4.3.6 Elementos de máquina

A oferta de produtos e suas informações técnicas aceleraram as fases de projeto. A disponibilidade de modelos em *CAD 3D* possibilitou estudos precisos das necessidades espaciais das estruturas da minimáquina-ferramenta e as análises de elementos finitos. As fabricantes HIWIN® e SYK® disponibilizam bancos de dados de todos os seus elementos de máquinas. Sua licença de uso é aberta a todos usuários cadastrados em seus domínios. Destaca-se a qualidade dos desenhos técnicos e modelos 3D.

Os modelos de SP considerados no projeto foram da empresa TEKMAF *Spindles*®. Os suportes dos SP foram modelados a partir dos desenhos técnicos dos respectivos catálogos.

Os modelos 3D dos parafusos foram obtidos através do *add-on* McMASTER-CAR® nativo do Fusion 360®.

De posse de todos os modelos dos componentes, equipamentos, elementos de máquinas comerciais e domínio da ferramenta *CAD-CAE* do Fusion 360® as atividades de projeto, análises e otimizações dos dez protótipos ocorreram em etapas organizadas de forma orgânica e sistematizada.

4.3.7 Considerações finais

Considerando o término do prazo para conclusão do Projeto de Final de Curso e que o trabalho foi realizado em apenas 4 meses, o avanço no projeto mecânico foi significativo, contemplado modelos 3D detalhados e as respectivas simulações de desempenhos estáticos para nortear etapas futuras de projeto dando continuidade ao Projeto de Pesquisa FAPEMIG APQ-01759-17 coordenado pelo professor Dr. Arthur Alves Fiocchi.

Reforça-se que este trabalho se originou dos resultados de Rodrigues (2022) que apontou a estrutura portal simétrica de GS adequada para máquinas-ferramentas de precisão. Embora a geometria da estrutura estivesse definida, não havia uma estrutura prévia modelada, sendo o projeto mecânico detalhado a principal contribuição deste projeto de conclusão de curso.

Os resultados desta pesquisa irão embasar novos ciclos de projeto atualizando os requisitos geométricos da estrutura, seleção de materiais, propriedades mecânicas, elementos de máquinas, sistemas lineares e dimensionamento dos subsistemas elétricos, eletrônicos, hidráulicos e pneumáticos, não obstante o atendimento as normas técnicas vigentes para entregar um projeto de engenharia e um protótipo de minimáquina-ferramenta multifuncional de precisão de estrutura de granito sintético agregando manufatura aditiva, manufatura subtrativa e inspeção em um único sistema de alta tecnologia de manufatura 4.0.

5 CONCLUSÃO

Diante do exposto, pode-se objetivamente concluir que:

O projeto mecânico de minimáquina-ferramenta multifuncional de precisão de granito sintético (GS) cumpriu seu objetivo em avançar o desenvolvimento científico e tecnológico do projeto de minimáquinas-ferramenta de precisão.

Alguns requisitos de projeto, como o envelope útil de trabalho, devem ser atualizados.

O *software* Fusion 360[®] é uma ferramenta robusta, completa e foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho. As simulações em nuvem possibilitaram a realização da pesquisa. A disponibilidade de licença acadêmica será explorada em próximos trabalhos.

Os protótipos de 1 a 9 foram necessários para que o autor se qualificasse com as técnicas de projeto, aprendizado do *software*, familiarização dos elementos de máquinas que compõem uma máquina-ferramenta, visualização geral do projeto e estudos de otimização visando um olhar sistêmico de projeto, manufatura, montagem e validação do equipamento.

O protótipo 10 fechou o primeiro ciclo de projeto e mostrou todo o caminho a seguir nas próximas fases de trabalho. Trouxe clareza nas necessidades urgentes de desenvolver otimizações mássicas e de forma das estruturas base, X e Z. A necessidade de desenvolvimento de material próprio de GS bem como sua caracterização completa para otimizar os dados e resultados das análises por elementos finitos. A estrutura apresentou deformações acima dos objetivos de projeto.

A literatura sobre as propriedades do GS permitiu reunir as propriedades típicas para realizar simulações por elementos finitos da estrutura da minimáquina-ferramenta, porém as propriedades reais somente serão validadas após ensaios mecânicos e validação da máquina-ferramenta.

A literatura sobre GS é limitada em informações relevantes no que tange as propriedades mecânicas reais relacionadas com composição (receita) e método detalhado de fabricação, sendo observado muito sigilo industrial.

O desenvolvimento e caracterização do GS se faz necessário para as próximas etapas.

O GS demonstrou ser um promissor material para a estrutura base e estrutura X. Devido a densidade do GS ser maior do que algumas ligas de alumínio e os resultados demonstrarem maiores deformações na estrutura Z, o material dessa estrutura ficou em aberto para análises futuras. A intenção de reduzir a massa, e conseqüentemente a força peso, das estruturas Y e Z levou a questionar o uso de materiais com melhores relações de densidade/rigidez.

A vasta quantidade de elementos de máquinas ofertadas no mercado possibilitou a adequação destes no projeto de forma fácil e rápida. Destaca-se o fornecimento de informações de qualidade sobre cada elemento de máquina e sua conseqüente aplicação por parte dos fabricantes e fornecedores. Assim, a tarefa principal foi a coalizão destes componentes através de uma estrutura rígida e compacta.

Não foi observado no mercado a disponibilidade de insertos metálicos que auxiliem na criação e construção de uma estrutura de GS. Assim, a criação e confecção deles devem ser consideradas.

O projeto da minimáquina-ferramenta cumpriu sua função de direcionar e trazer clareza sobre os aspectos de funcionalidade e forma das estruturas, disposição dos elementos de máquinas e a importância das propriedades mecânicas do material que comporá a estrutura da minimáquina-ferramenta.

Otimização geométricas das estruturas de GS são necessárias e serão realizadas em trabalhos futuros. Os resultados obtidos apontam que é possível criar uma estrutura multifuncional com custos menores de fabricação, montagem e manutenção.

6 PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS

- Otimizar as estruturas da minimáquina-ferramenta a fim de realizar a redução de massa e conseqüentemente gerar menores deformações devido a atuação da gravidade;
- Otimizar as dimensões das estruturas da minimáquina-ferramenta ajustando os comprimentos de guia para que fiquem exatamente com as faixas nominais de projeto;
- Simulação em elementos finitos contemplando a análise modal da minimáquina-ferramenta;
- Projetar os insertos necessários para o completo funcionamento da minimáquina-ferramenta;
- Criação e desenvolvimento dos moldes para a fabricação da minimáquina-ferramenta; e
- Desenvolvimento de materiais compósitos de granito sintético (agregados + polímeros + reforço) próprios com propriedades conhecidas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHBY, M.F. JONES, D. R. H. Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design. Engineering Department, Cambridge University, England. Pergamon Press, vol 39. 1986. 201 – 240 p.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-032532-3.50026-7>

ATES, E. GERGER, M.N. Usability of polymer concrete as a machine-making material regarding fatigue strength. Bahkesir: World Journal of Engineering and Technology, 2013. 59-64 p. <https://doi.org/10.4236/wjet.2013.13009>

AZETEK. Rolamentos e componentes industriais. Disponível em:
 <<https://www.azetek.com.br/>>. Acesso em: 18/04/2022.

BAHRI, H. *et al.* CNC Edge Finishing of Granite: Effect of Machining Conditions on Part Quality, Cutting Forces, and Particle Emissions. Department of Mechanical Engineering, École de Technologie Supérieure, Montreal – Canadá. 2021.

BRINKSMEIER, E. MUTLUGÜNES, Y. KLOCKE. F. AURICH, J. C. SHORE, P. OHMORI, H. Ultra-precision grinding. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2010. 652 – 671, p. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.001>

BRUNI, C. FORCELESE, A. GABRIELLI, F. SIMONCINI, M. Effect of lubrication-cooling technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface finish and tool wear in finish turning of A/SI 420B. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2005. 1547-1554 p.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.09.007>

CASTRO, H. F. F. Orientações para seleção e projeto de guias de máquinas-ferramenta. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC. Agosto de 1987. 279 p.

CALLISTER, D. Ciência e engenharia de materiais uma introdução. 8ª Edição. LTC – Livros Técnicos Científicos Editora Ltda. Rio de Janeiro, RJ. 2012.

CHAPMAN, G. Ultra-Precision machining systems; an enabling technology for perfect surfaces. Moore Nanotechnology Systems LLC, Keene – USA. Disponível em: <<https://nanotechsys.com/our-technology/>>. Acessado em: 21/04/2022.

CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. 7ª Edição. ABM. São Paulo – SP. 2015. 599 p.

CHU, C.L. *et al.* Development of High-precision Micro CNC Machine with Three-dimensional Measurement System. Department of Mechanical Engineering, Southern Taiwan University, Tainan. 2012. 7 p.

CORTÉS, F. CASTILLO, G. Comparison between the dynamical properties of polymer concrete and grey cast iron for machine tool applications. Elsevier: Materials and Design, vol 28. 2006. 1461 - 1466 p. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.03.012>

EVANGELISTA, A. S. SILVA, J. Processo de fundição e sua versatilidade na fabricação de peças. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ed. 03, Vol. 11, pp. 21-50. Março de 2020. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/processo-de-fundicao>>. Acesso em: 2022.
<https://doi.org/10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/processo-de-fundicao>

FERNANDES, M. C. S. GADIOLI, M. C. B. AGUIAR, M. C. Produção de rocha aglomerada artificial fabricada com resíduos de quartzito e resina vegetal. XXVIII Jornada de Iniciação Científica e IV Jornada de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. 2020.

FLI. Centre de services linéaires. Catálogo GL-2021. Disponível em: <<https://www.desantirolamentos.com.br/catalogos.php>> . Acesso em: 2022.

FORTULAN, C. A. Aula 06 – Movimentação linear. Projeto Mecânico, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. Notas de aulas v.2018. 71 p.

FORTULAN, C. A. *et al.* Aula 05 – Estruturas de Máquinas. Projeto Mecânico, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. Notas de aulas v.2021. 77 p.

HALE, L.C. Principles and Techniques for Designing Precision Machines. Lawrence Livermore National Laboratory, University of California. Livermore, California. 1999. 493 p.

HERMLE®, M. B. 03 Technical data C650. Disponível em: <www.hermle.de>, Acesso em: 10/03/2022.

HIWIN®. Ballscrews. HIWIN Technologies Corp. Impresso na Tailândia, 21nd edição. Júlio de 2018. 218 p.

HIWIN®. Linear Guideway. HIWIN Technologies Corp. Impresso na Tailândia, 22nd edição. Júlio de 2020. 232 p.

HIWIN®. Motion Control and System Technology. HIWIN Technologies Corp. Disponível em <<https://motioncontrolsystems.hiwin.us/category/all-categories>>. Acessado em: 12 de Janeiro de 2022.

HUO, D. CHENG, K. A dynamics-driven approach to the design of precision machine tools for micro-manufacturing and its implementation perspectives. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2008. 1-13 p. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM839>

IFRS. Tecnologia em processos metalúrgicos. Instituto Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/tecnologiaprocessometalurgico/fundi-cao-ii/moldes-colapsaveis>>. Acessado em: 01/12/2021.

SCHAEFLER, KG. Linear Guidance System. INA Linear Technology. Setembro de 2007. 20 p.

IKAWA, N. *et al.* Ultraprecision metal cutting – The past, the present and the future. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 40:587-594, p. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61134-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61134-2)

KALATEC. Guias Lineares. Disponível em: <<https://www.kalatec.com.br/guia-linear/>>. Acesso em: 2022.

KENDA, J. KOPAC, J. Diamond tools for machining of granite and their wear. university of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Slovenia. 2009. 775-780 p.

KEPCZAK, N. PAWLOWSKI, W. Application of Mineral Casting for Machine Tools Beds. Mechanics and Mechanical Engineering, Lodz University of Technology. Vol. 17, No 4. 2013. 287 – 289 p.

KERN®, M, G. Kern Micro Plataforma (english version): Micro HD| Micro Vario | Micro Pro. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Efc2-IPR_IM&t=142s> minuto 2:10, Acesso em: 21/11/2021.

KERN®, M, G. Kern Micro HD. Disponível em: <www.kern-microtechnik.com>, Acesso em: 10/03/2022.

KIM, J-D. KIM, D-S. Surface characteristics of magnetic-disk cutting using a single-crystal diamond tool in an ultraprecision lathe. Journal of Materials Processing Technology, N° 59, 1996. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)02196-5](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)02196-5)

KOBLISCHEK, P.J. Acryl-Concrete. Proc. Second International Congress on Polymers in Concrete, 1978, pp 413-430.

KREIENBÜHL, R. International Congress on Polymers in Concrete. North American Workshop, San Francisco. 1991.

LACALLE, L. N. L. LAMIKIZ, A. Machine Tools for High Performance Machining. Springer – Verlag London Limited. 2009. 455 p.

LASPAS, T. *et al.* Novel methodology for the measurement and identification for quase-static stiffness of five-axis machine tools. Precision Engineering, 65ª Edição. 2020. 164 – 170 p. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.06.006>

LINTZ, R.C.C. Estudo de Materiais Alternativos para Fabricação de Estruturas de Máquinas-Ferramenta. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2003. 120 p.

MATWEB. *MatWeb Material Property Data*. Disponível em: <<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=7a199e0fd6d94597b400aea5157c1a3e>>. Acessado em: 18/03/2022.

MCKEOWN, P. A. MORGAN, G. H. *Epoxy granite: a structural material for precision machines. Precision Engineering*. 1979. 227 – 229 p. [https://doi.org/10.1016/0141-6359\(79\)90104-1](https://doi.org/10.1016/0141-6359(79)90104-1)

MONFERRATO. O que é um molde de fundição? Quais são os seus tipos? Disponível em: <<https://monferrato.com.br/o-que-e-um-molde-de-fundicao-quais-sao-os-seus-tipos/>>. Acesso em: 30/11/2021.

MÖHRING, *et al.* Materials in machine tool structure. CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2015. 725-748 p. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.005>

MORO, N. AURAS, A. P. Processos de fabricação, fundição. Centro Federal de Educação de Santa Catarina, Florianópolis – SC. Notas de aulas v.2007. 29 p.

NSK. Guias lineares. Disponível em: <<https://www.nsk.com.br/guias-lineares-359.htm>>. Acesso em: 2022.

PAHL, Gerard; BEITZ, Wolfgang. **Engineering Desing: A Systematic Approach**. Editado por Ken Wallace. 1ª Edição. *The Design Council*, Reino Unido, 1988. 212 p.

PAHL, Gerard; BEITZ, Wolfgang; FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich. Projeto na Engenharia: Fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, Métodos e Aplicações. 6ª Edição. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2013. 412 p. 455 desenhos e ilustrações.

PAN, Z. *et al.* Chatter analysis of robotic machining process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. 301 – 309 p. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.11.033>

PI, P. I. Solution for Precision Motion and Positioning. Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG. Alemanha. Disponível em: <<https://www.physikinstrumente.com/en/products/linear-stages/stages-with-magnetic-direct-drive-linear-motor/a-123-piglide-at3-linear-stage-with-air-bearings-900718/>> Acesso em: 29/03/2022.

RAKSIRI, C. PARNICHKUN, M. Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol 44. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.04.016>

RAMNATH, R. A. THYLA, P. R. HARISHSHARRAN, A. K. R. Machining parameter selection in milling epoxy granite composites based on AHP. Department of Mechanical Engineering, PSG College of Technology, Coimbatore, India. 2020.

RAMNATH, R. A. THYLA, P. R. Measurement and optimization of multi-attribute characteristics in milling epoxy granite composites using RSM and combined AHP-topsis. Department of Mechanical Engineering, PSG College of Technology, Coimbatore, India. 2022.

RAMPF®. How to – Manufacturing Mineral Cast Components. Disponível em: <<https://www.rampf-group.com/en/aktuelles/blog/2021/how-to-1-manufacturing-mineral-casting-components/>>. Acesso em: 2022.

RELEA, E. WEISS, L. WEGNER, K. Experimental Study on the Geometrical and Dimensional Stability of Natural Stone Sorts for Precision Machinery. 26th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference. 2019. 89 – 94 p.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.107>

RENKER, H.J. Stone-based structural materials. Precision Engineering, NO 3, VOL 7. Butterworth & Co Ltd. Júlio de 1985. 161 – 164 p. [https://doi.org/10.1016/0141-6359\(85\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0141-6359(85)90041-8)

REXTOTH, B. Roller rail systems. Acesso em: <<https://www.boschrexroth.com/pt/br/produtos/grupos-de-produtos/tecnologia-de-acionamento-linear/linear-guides/roller-rail-systems>>. Acesso em: 18/04/2022

RIBEIRO, M. M. PURQUERIO, B. M. Granito sintético para estruturas de equipamentos de precisão de pequeno porte – Metodologia de projeto. XV Congresso de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia – SP. Novembro de 1999. 8 p.

ROCHA, A. S. Contribuições na Fabricação de Mancais Aerostáticos. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Santa Catarina, Florianópolis – SC. Setembro de 1993. 163 p.

RODRIGUES, E. S. Projeto geométrico e estrutural de minimáquina-ferramenta multifuncional de precisão. Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia - MG. 2022. 132 p.

RUBIO, J. C. C. Projeto, construção e avaliação de microposicionadores para usinagem de ultraprecisão. Universidade de São Paulo, Unidade de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos – SP. 2000. 287 p.

SAPKAL, S. U. SALUNKHE, V. P. Experimentation and Analysis of Granite Super-Finishing Process for Flatness Testing. Materials Today: Proceedings 5. 23603–23611. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.149>

SCHROETER, R. Usinagem de Ultraprecisão de Elementos Ópticos Transmissivos no Espectro Infravermelho. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 1997.

SILVA, L.J. OLIVIERA, E. M. LEITE, W.O. RUBIO, J.C.C. PANZERA, T. H. Desenvolvimento de uma máquina-ferramenta com alta capacidade de amortecimento. Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Ponta Grossa - PR. 2011. 12 p.

SLOCUM, A. H. Precision Machine Design. Massachusetts Institute of Technology. Society of Manufacturing Engineers Dearborn, Michigan. 1992. 746 p.

SMITH, S.T., CHETWYND, D.G., 1994, Foundations of Ultra-Precision Mechanism Design, Gordon and Breach Science Publisher.

SOUZA, F. N. *et al.* Trabalho de fundição com molde permanente. Universidade Paulista, Fabricação Mecânica. Campinas – SP. 2011. 6 p.

STOETERAU, R. L. Comportamento estático e dinâmico de luvas aerostáticas para guias lineares. Universidade Federal de Santa Catarina, departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis – SC, abril de 1992. 117 p.

STOETERAU, R. L. Materiais para Base de Máquinas e Equipamentos de Precisão. LMP/UFSC. 1995.

STOETERAU, R. L. Desenvolvimento do protótipo de uma máquina-ferramenta comandada numericamente para usinagem de ultraprecisão com ferramenta de geometria definida. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica. Florianópolis, SC. 1999. 243 p.

STOETERAU, R. L. Introdução ao Projeto de Máquina-Ferramentas Modernas. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica. Florianópolis, SC. 2004. 114 p.

STOETERAU, R. L. PMR – 3501 – A18 – 2020 – Mancais e Guias Hidrostáticas. Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. Moodle e-Disciplinas. 42 minutos. Disponível em: <<https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=3215332&forceview=1>>, acesso em: 25/03/2022a.

STOETERAU, R. L. PMR – 3501 – A18 – 2020 - Guias e mancais aerostáticos. Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. Moodle e-Disciplinas. 42 minutos. Disponível em: <<https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=3224784>>, acesso em: 25/03/2022b.

STUDER. The Art of Grinding. Disponível em: <<https://www.studer.com/en/>>. Acesso em: 25/04/2022.

STUDER. Granitan® Machine Bed. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=cnQjkuJXWc>>. Acesso em: 18/012/2021

SYK®. Professional manufacturer 2020. Catálogo de peças. Edição de maio de 2018. Disponível em <www.syk.tw>. Acesso em janeiro de 2022.

TECHMAKERS®. Produtos para automação. Motor de Passo Akiyama NEMA 31 – 100Kgf.cm – AK34/100F8FN1.8. Joinville, SC. Disponível em: <<https://www.techmakers.com.br/produto/motor-de-passo-akiyama-nema-34-100kgf-cm-ak34-100f8fn1-8-70088>>. Acesso em: 06 abril 2022.

TECH INGREDIENTS®. Super strong epoxy with diamonds and more! Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=6KjlyXKeo8c&list=PL_eYEO-5G8w6TjRk3OabdPux28Pm65Jkl&index=3>. Acesso em: 2022.

TECHTUDO. SSD ou HDD: Saiba qual é o mais potente e barato para 'guardar memória'. Disponível em: <<https://www.techtudo.com.br/noticias/2015/12/ssd-ou-hdd-saiba-qual-e-o-mais-potente-e-barato-para-guardar-memoria.ghtml>>. Acesso em: 15/05/2022

TECMAF®. Soluções em Spindle, Suporte para Fixação de Motor diâmetro 100 mm. Disponível em: <<https://loja.tecmaf.com.br/>>. Acesso em: 24/01/2022.

VALEA, P. Aspects regarding the cutting capacity of diamond discs used in the flat grinding of hard granite and basalt mineral materials. *Journal of Engineering Studies and Research*, Volume 27. 2021. 83 – 92 p. <https://doi.org/10.29081/jesr.v27i3.292>

ZHANG, S. J. TO, S. ZHANG, Q. G. Diamond tool wear in ultra-precision machining. Springer-Verlag, London. 2016. 613 – 641, p. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8751-9>

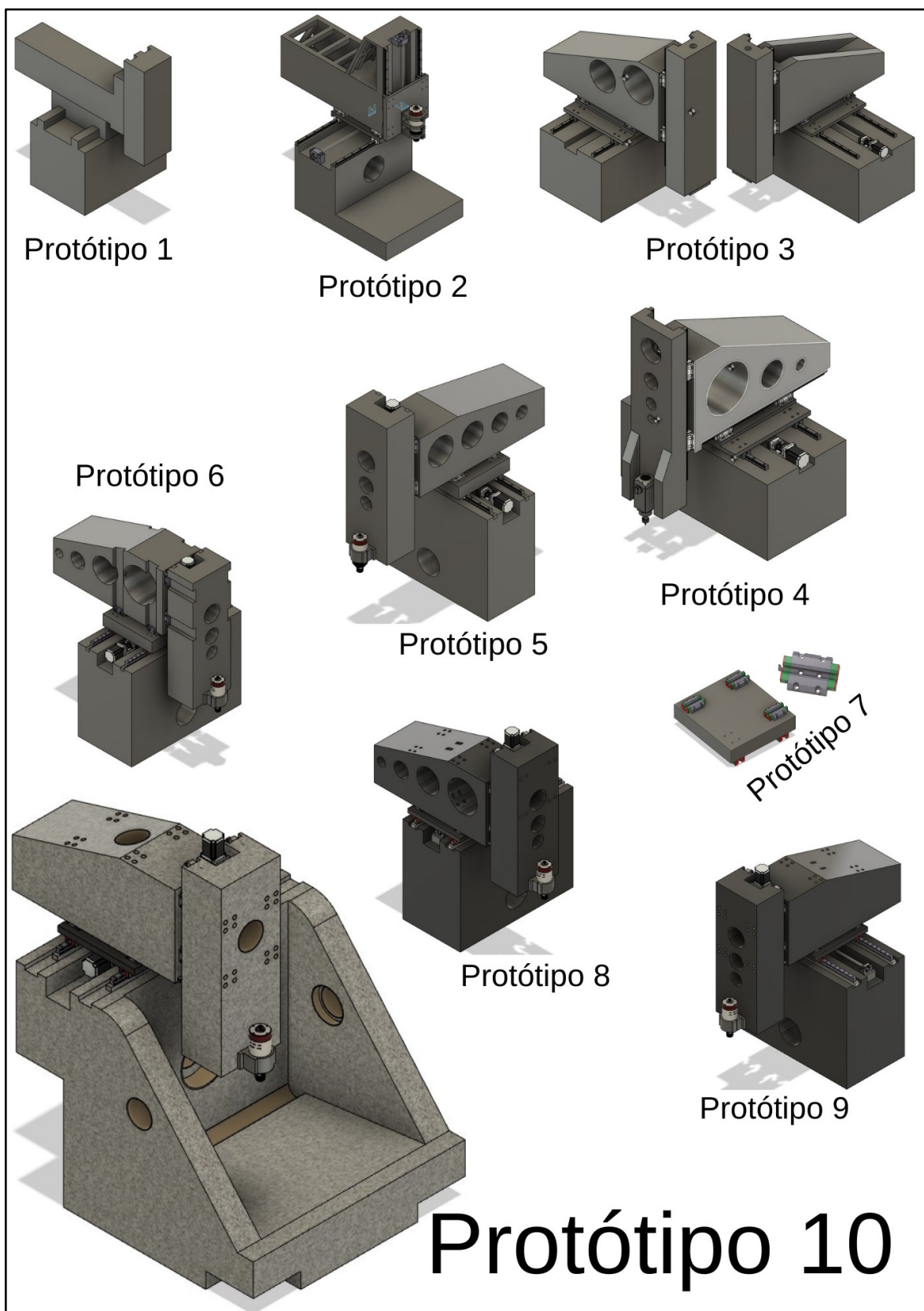
ZHAO, Q. GUO, B. Ultra-precision grinding of optical glasses using mono-layer nickel electroplated coarse-grained Diamond wheels. Part 2: Investigation of profile and surface grinding. Centre for Precision Engineering, School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, China. 2014. 67 – 78, p. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.07.007>

WEINGAERTENER, W.L., STOETERAU, R. L. Torno para usinagem de ultraprecisão numericamente controlado. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica. Florianópolis, SC. 1999. 10 p.

YU, N. H. CHAN, C. Y. LI, L. H. LEE, W. B. Spectral analysis of surface roughness features of a lapped ultraprecision single-point diamond machined surface. Springer-Verlag, London. 2016. 1407 – 1415. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8684-3>

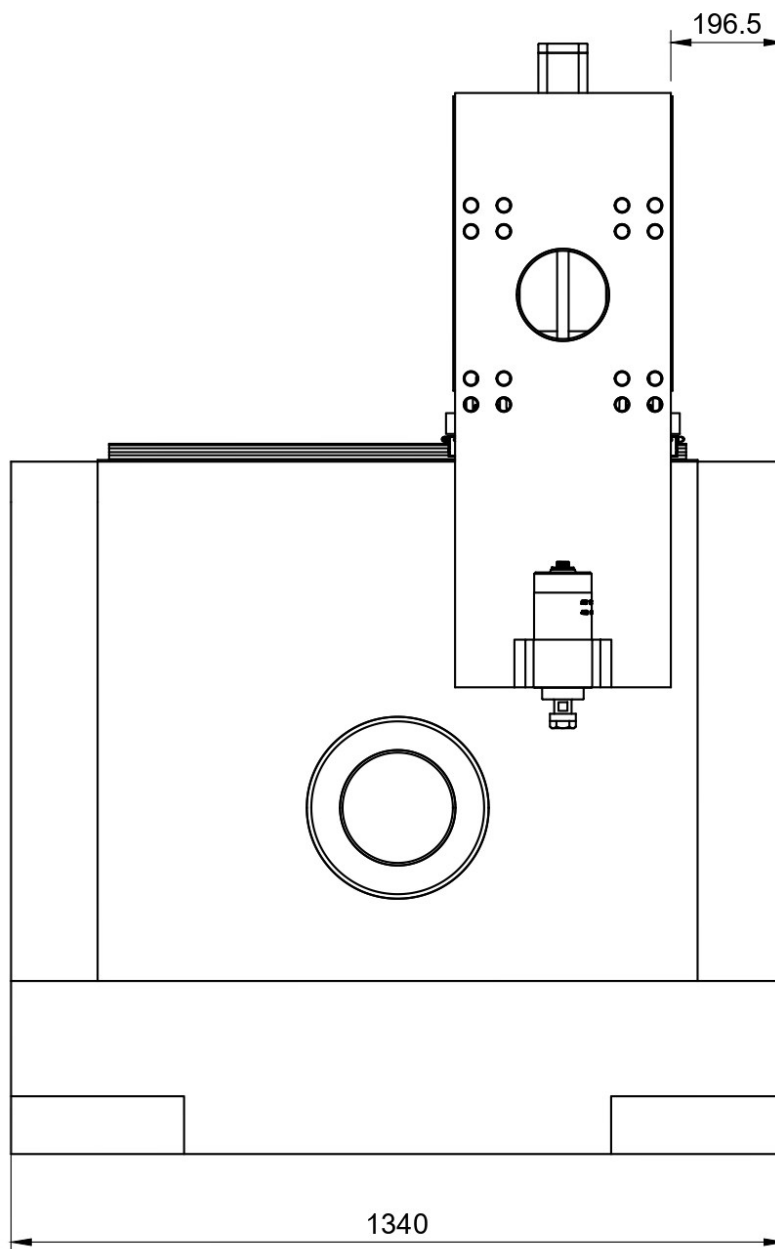
Apêndice A

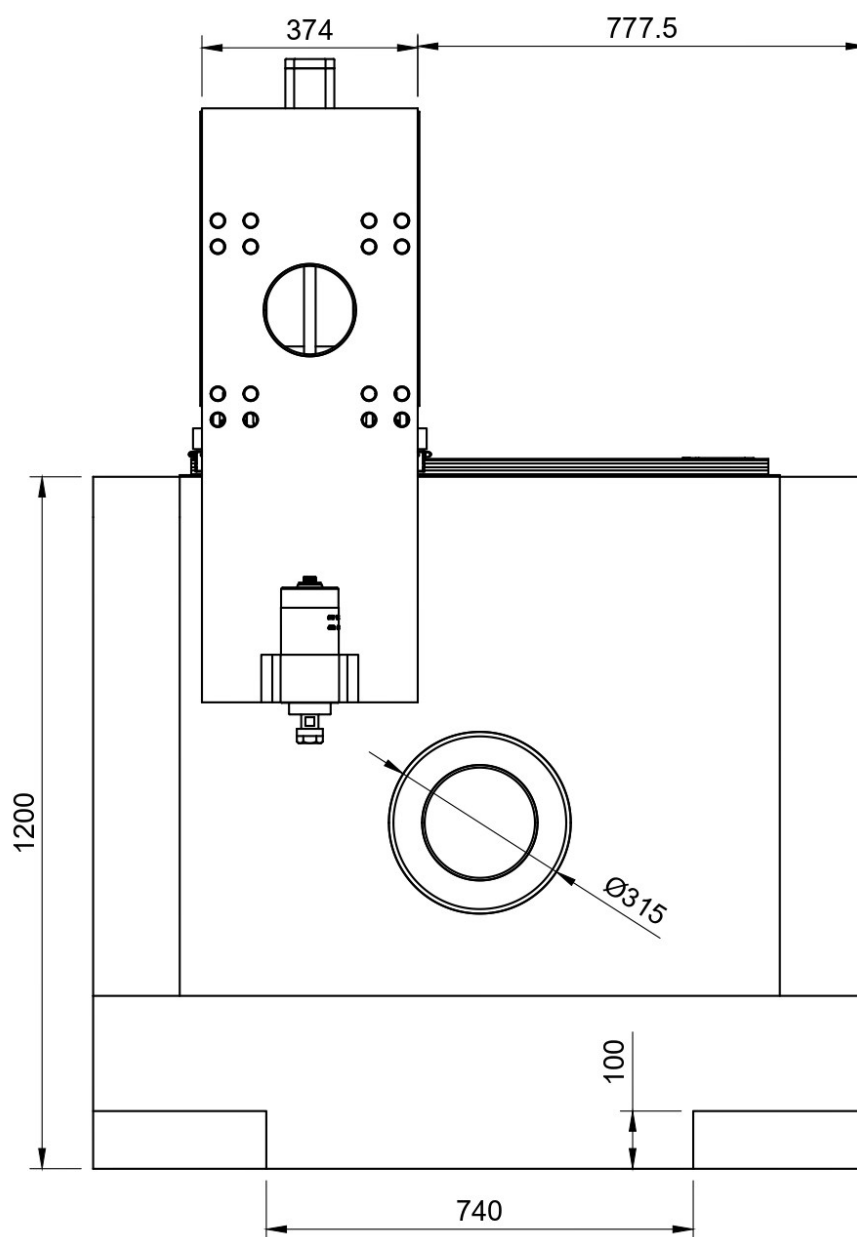
APÊNDICE A – Mosaico contendo os 10 protótipos

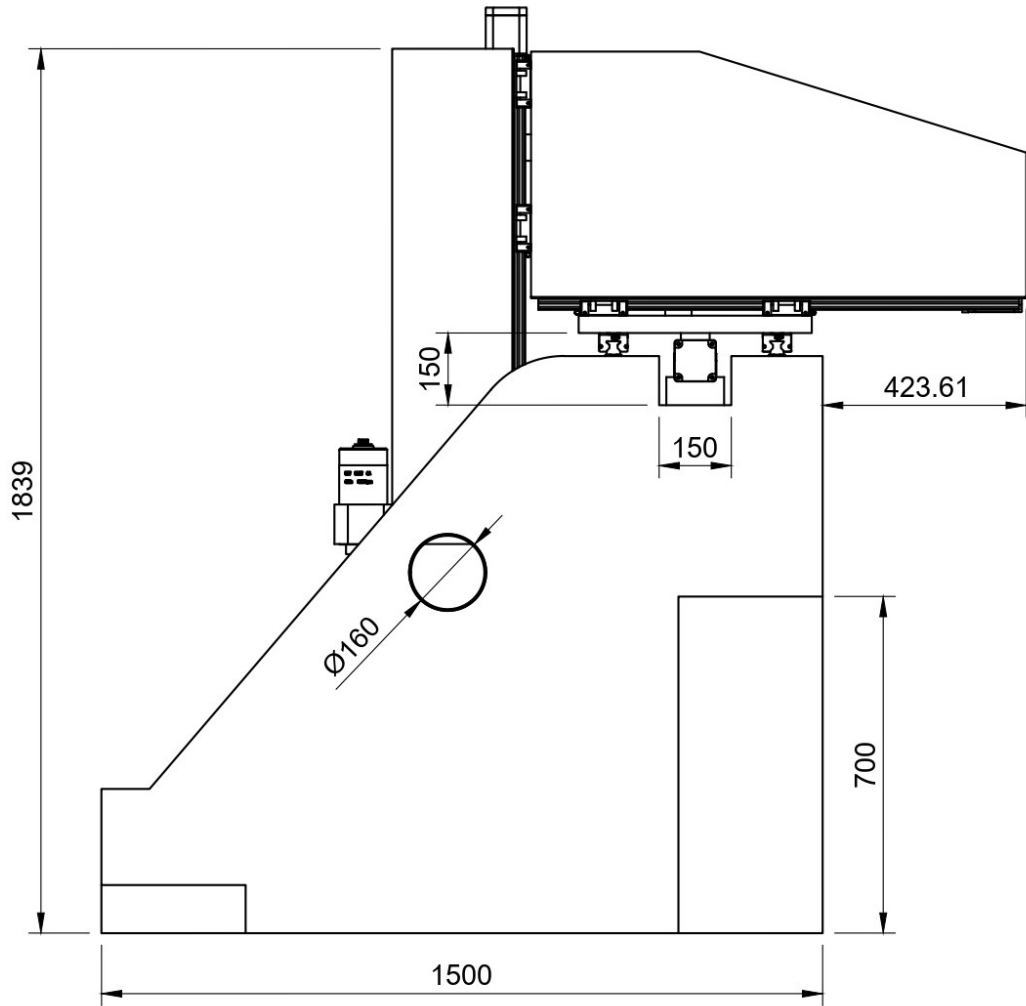


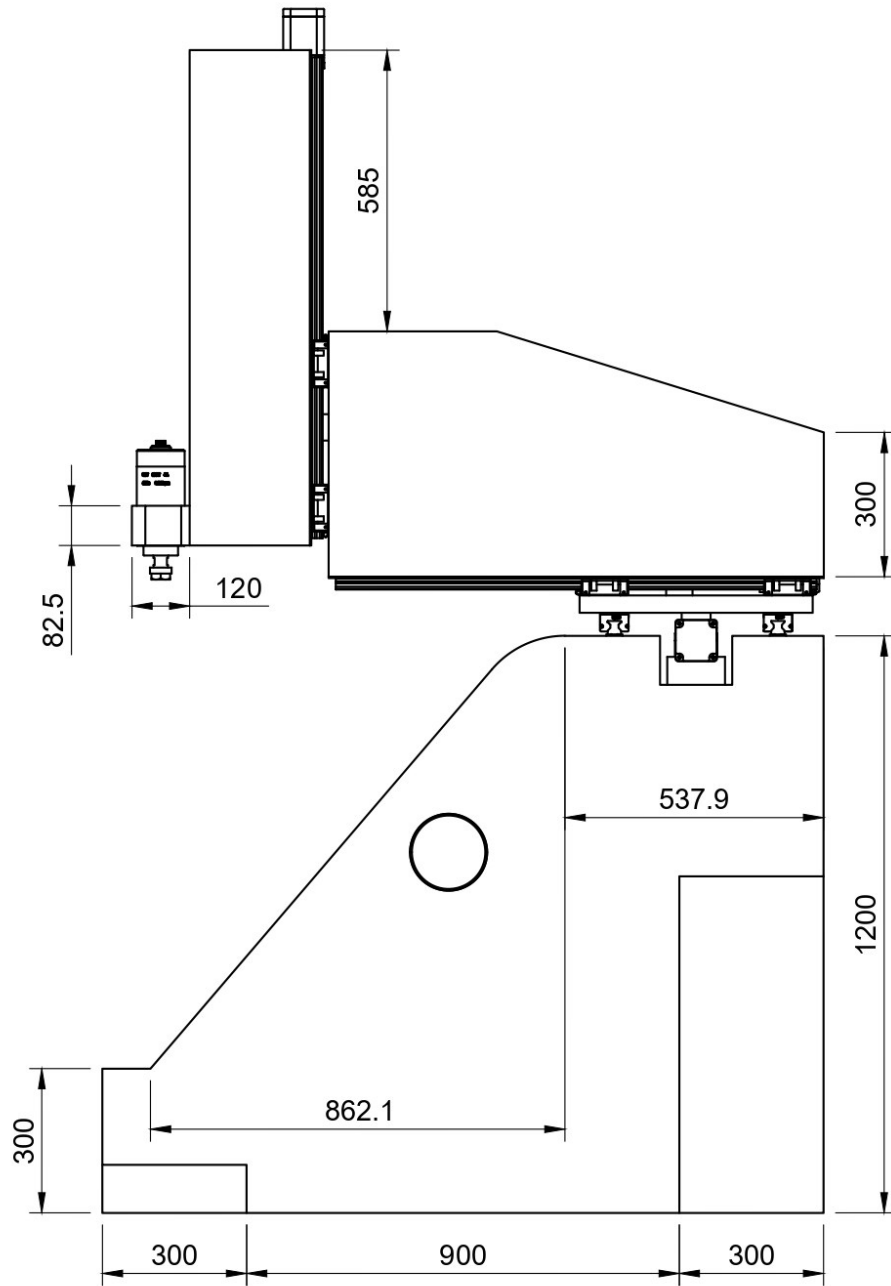
Apêndice B

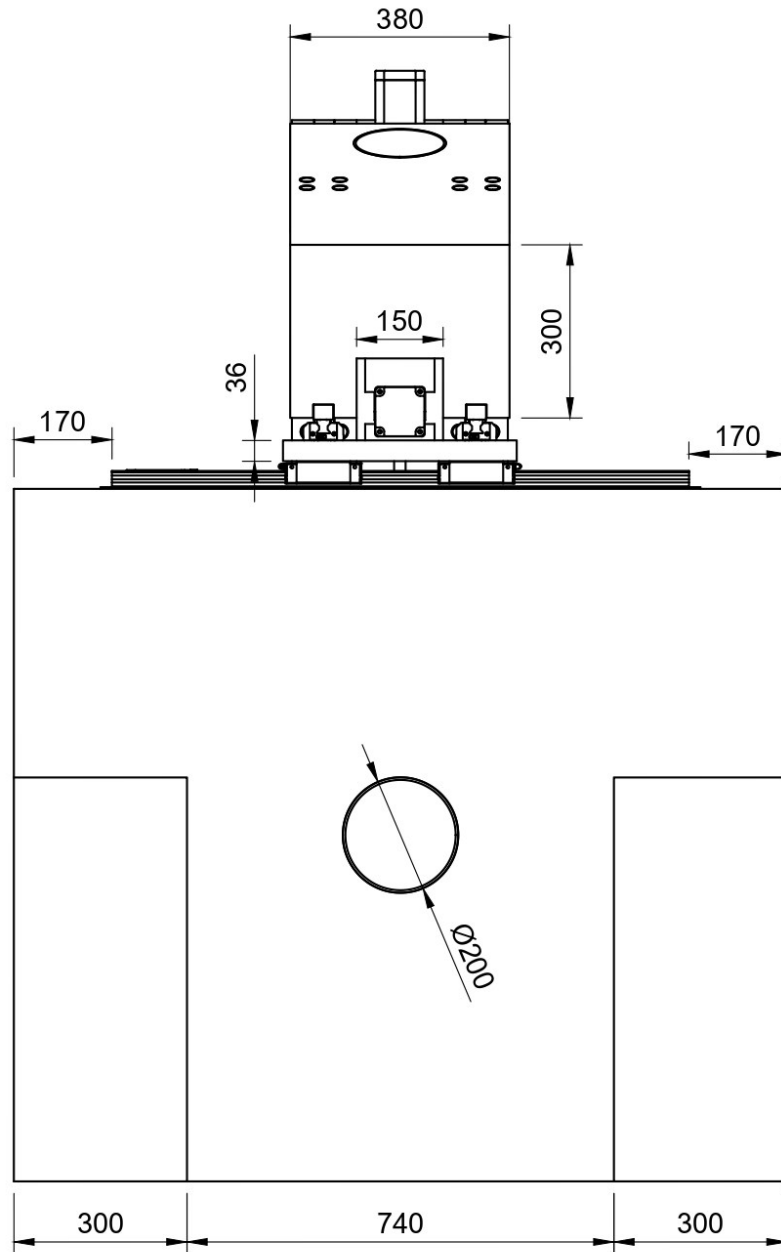
APÊNDICE B – Desenhos 2D do Protótipo 10.





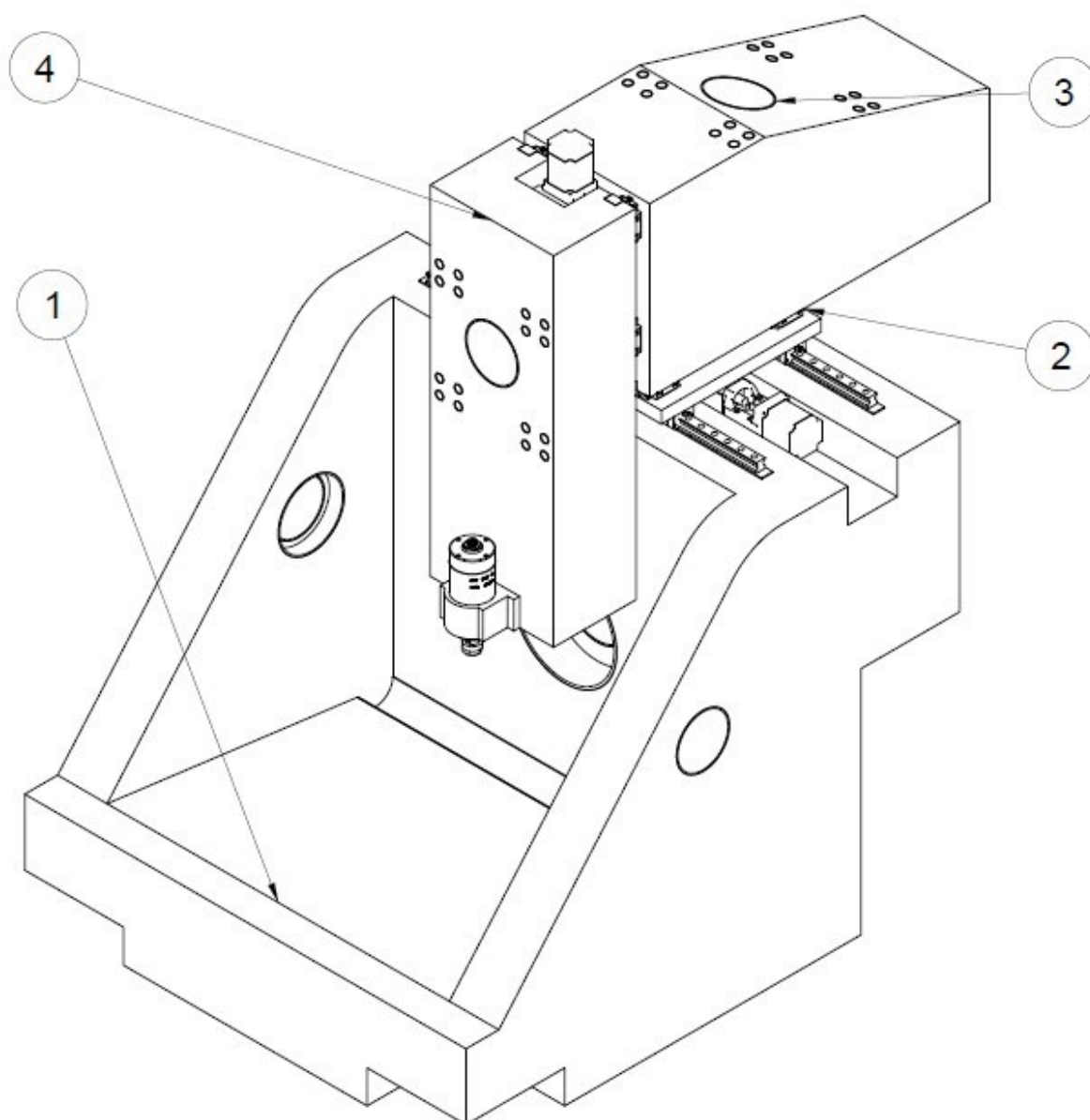






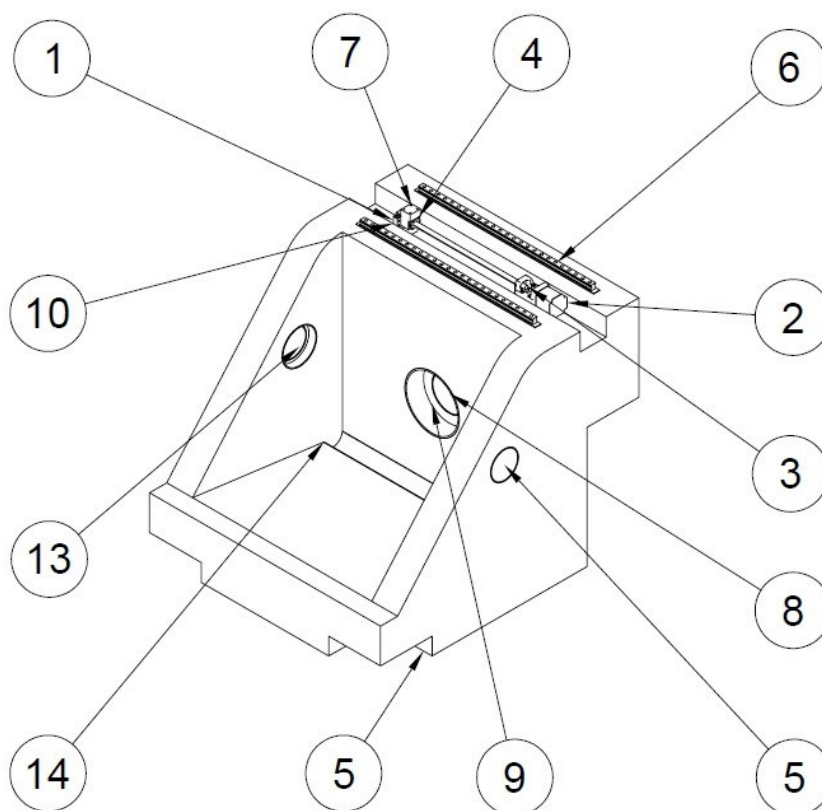
APÊNDICE C

APENDICE C – Lista de materiais



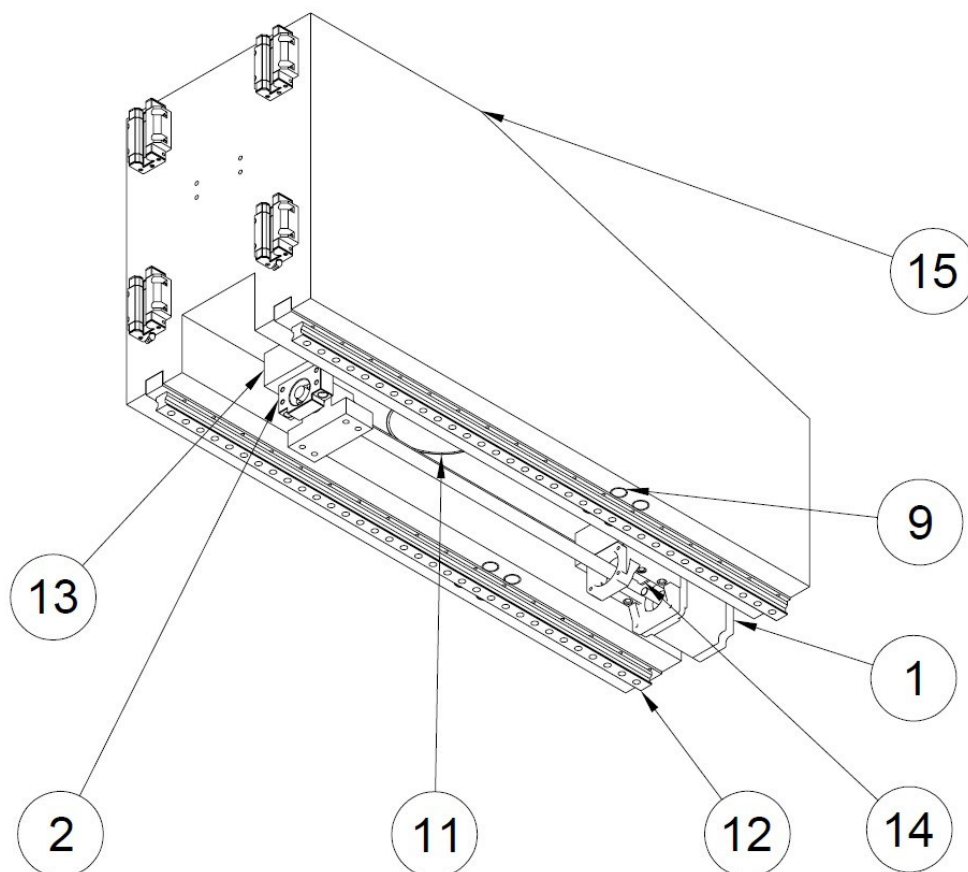
Lista de Peças		
Item	Qtd	Nome da Peça
1	1	Estrutura Base X
2	1	Flange XY
3	1	Estrutura Y
4	1	Estrutura Z

Apêndice C



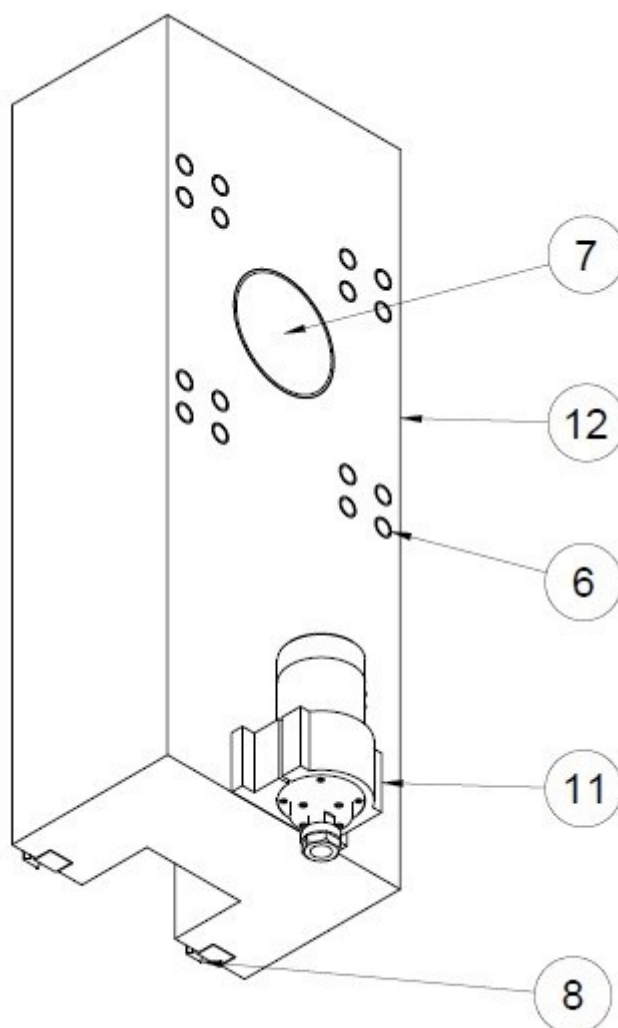
Lista de Peças		
Item	Qtd	Nome das Peças
1	1	BF20 SYK
2	1	Unidade de Potência
3	1	Fuso 20 mm
4	1	20-10K4-FSC-B-3.000-HiwinCorporation
5	1	Estrutura X
6	2	Nivelador Guia RG30
7	1	Abraçadeira 20-10K4-FSC - 75mm - Eixo X
8	1	Tubo 200 mm
9	1	Tubo 300 mm
10	1	Espaçador Unidade de Suporte
11	1	Suporte Unidade Potencia
12	2	Tubo 150 mm
13	2	Tubo 200 mm
14	1	Tubo 100 mm

Apêndice C



Lista de Peças		
Item	Qty	Nome das peças
1	1	Unidade de Potência
2	1	BF20 SYK
3	1	Fuso 20 mm
4	1	20-10K4-FSC-B-3.000
5	2	RGW25CCZAP
6	2	RGW25CCZAP
7	1	Abraçadeira 20-10K4-FSC - 75mm - Eixo Y
8	1	Nivelador Guia R25 Montado
9	1	PVC 25 mm
10	1	PVC 25 mm
11	1	PVC 500 mm
12	1	Nivelador Guia R25 Montado
13	1	Espaçador Unidade de Suporte
14	1	Suporte Unidade Potencia
15	1	Estrutura Y

Apêndice C



Lista de Peças		
Item	Qtd	Nome da Peça
1	1	Unidade de Potência
2	1	BF20 SYK
3	1	Fuso 20 mm
4	1	20-10K4-FSC-B-3.000
5	1	Abraçadeira 20-10K4-FSC - 75mm - Eixo Z
6	1	Tubos PVC 25 mm
7	1	Tubo PVC 150 mm
8	2	Nivelador Guia R25 Montado
9	1	Espaçador Unidade de Suporte
10	1	Suporte Unidade Potencia
11	1	Spindle montado
12	1	Estrutura Z