

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECANICA – FEMEC

ERIC SILVA RODRIGUES

**PROJETO GEOMÉTRICO E ESTRUTURAL DE MINIMÁQUINA-FERRAMENTA  
MULTIFUNCIONAL DE PRECISÃO**

Uberlândia

2022

ERIC SILVA RODRIGUES

**PROJETO GEOMÉTRICO E ESTRUTURAL DE MINIMÁQUINA-FERRAMENTA  
MULTIFUNCIONAL DE PRECISÃO.**

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

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi

Uberlândia

2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R896 2022	Rodrigues, Éric Silva, 1995- PROJETO GEOMÉTRICO E ESTRUTURAL DE MINIMÁQUINA- FERRAMENTA MULTIFUNCIONAL DE PRECISÃO [recurso eletrônico] / Éric Silva Rodrigues. - 2022.  Orientadora: Arthur Alves Fiocchi. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Mecânica. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia.  1. Engenharia mecânica. I. Fiocchi, Arthur Alves, 1981- , (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.  CDU: 621
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:  
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

ERIC SILVA RODRIGUES

**PROJETO GEOMÉTRICO E ESTRUTURAL DE MINIMÁQUINA-FERRAMENTA  
MULTIFUNCIONAL DE PRECISÃO**

Trabalho de conclusão de curso aprovado  
para a obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica pela Faculdade de  
Engenharia Mecânica - UFU com banca  
examinadora formada por:

Uberlândia, 26 de abril de 2022

---

**Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi (FEMEC-UFU)**

---

**Prof. Dr. Alexandre Zuquete Guarato (FEMEC-UFU)**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a **DEUS**, pela oportunidade de trilhar por este caminho para alcançar esta vitória e por todas as bênçãos recebidas durante esta minha conquista.

Aos meus **PAIS**, Mario Rodrigues dos Santos e Maria de Lurdes da Silva Rodrigues por me apoiar e me auxiliar durante minha jornada, sendo eles os principais exemplos que tive, me ensinando os princípios que carrego comigo hoje. Sem eles esta conquista não teria sido possível.

Ao meu **ORIENTADOR** Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi, obrigado pela contribuição na minha formação e por todo conhecimento passado no decorrer deste trabalho. Agradeço ao esforço, paciência, confiança e o suporte oferecido. Serei eternamente grato.

Aos **PROFESSORES DA FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA (FEMEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UERLANDIA (UFU)**, pela dedicação e empenho para oferecer seus conhecimentos contribuindo em minha formação durante toda a graduação.

Aos **COLEGAS E PROFESSORES DO LABORATÓRIO DE ENSINO E PESQUISA EM USINAGEM (LEPU) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA (UFU)**, pela amizade e troca de experiências e conhecimentos no desenvolvimento deste trabalho.

Aos **FUNCIONÁRIOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA (UFU)** os quais possibilitaram o funcionamento da universidade.

Ao **PROFESSOR** Alexandre Zuquete Guarato, agradeço a participação como membro da banca avaliadora de qualificação e pela contribuição no melhoramento deste trabalho.

Ao meu **IRMÃO** Talles Silva Rodrigues e aos seus colegas pela troca de experiências na dissertação de trabalhos acadêmicos, auxiliando assim na formatação deste trabalho.

A **EMPRESA Autodesk** por disponibilizar gratuitamente a licença de uso do programa *Autodesk Fusion 360*<sup>®</sup> para fins acadêmicos.

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

Agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, colaboraram no desenvolvimento deste trabalho e que se tornaram merecedores de um agradecimento especial.

## RESUMO

O presente estudo aborda o projeto estrutural preliminar de minimáquina-ferramenta multifuncional de granito sintético visando aplicação em manufatura avançada de ultraprecisão. A demanda por máquinas-ferramentas e células de manufatura capazes de desempenharem multiprocessos aditivos e subtrativos em macro e micro escala justifica o desenvolvimento de minimáquinas multifuncionais CNC. Na literatura estão descritas diversas estruturas geométricas e materiais de construção que também são aplicados em máquinas comerciais de precisão e ultraprecisão. Entretanto, o estado da arte não contempla estudos comparativos das influências geométricas no desempenho estrutural de máquinas de granito sintético. Motivado pelas propriedades do granito sintético e efeito geométrico estrutural, esta pesquisa aborda o projeto estrutural comparativo inicial de seis estruturas, a saber C (EC), pórtico (EP), tetraédrica (ET), octaédrica (EO), tetraédrica dupla (ETD) e octaédrica mais tetraédrica (EOT), sendo a ETD e a EOT geometrias originais. As condições de contorno incluíram envelope de trabalho de 400 mm x 400 mm x 400 mm e rigidez estática de 1 000 N/ $\mu$ m. Metodologia de projeto mecânico de engenharia e análise de elementos finitos foram utilizados para avaliar o desempenho comparativo mássico, dimensional, complexidade de fabricação, modos de vibração, tensões e deformações mecânicas. Os resultados da simulação estática apontaram menores deformações das estruturas convencionais EC e EP a partir da ação da gravidade isolada e da ação da gravidade e força de usinagem simultaneamente, enquanto as estruturas ETD e EOT apresentaram as maiores deformações. Os resultados da simulação dinâmica retornaram maiores modos de vibração para EC e EP, respectivamente, e o menor modo de vibração para a ETD. Quanto as massas das estruturas, em ordem crescente, os resultados foram EC, EP, ET, EOT, EO e ETD. Conclui-se que, dentre as geometrias analisadas, foi possível alcançar a rigidez desejada independentemente da geometria estrutural, entretanto com massas, complexidades de fabricação e modos de vibração distintos que podem refletir expressivamente no custo-benefício da estrutura. Apesar das estruturas terem sido submetidas a diversas iterações de otimização não se descarta a possibilidade de existirem estruturas similares de menores massas, volumes e até mesmo com melhores desempenhos estáticos e dinâmicos.

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

## ABSTRACT

This research covers the preliminary structural design of a multifunctional mini size machine tool of synthetic granite applied in advanced ultraprecision manufacturing. The demand for machine tools and manufacture cells capable of performing additive and subtractive multiple processes in macro and micro scale supports the development of small size CNC multifunctional machine. Several geometric structures and construction materials are described in the literature and applied in commercial precision and ultraprecision machines. However, the state of the art has a shortfall of comparative studies on the influence of geometrical forms in the performance of synthetic granite machines. The study aims a initial comparative structural design of six synthetic granite structures, namely, C (EC), gantry (EP), tetrahedral (ET), octahedral (EO), double tetrahedral (ETD), and octahedral plus tetrahedral (EOT) forms, being the ETD and EOT original geometries. Boundary conditions included an working envelope of 400 mm x 400 mm x 400 mm and a static stiffness of 1 000 N/ $\mu\text{m}$ . Comparative performances in mass, size, manufacturing complexity, vibration modes, tension distribution, and deformation were analyzed through mechanical engineering design methodology and finite element analysis (FEA). The results of the static simulation showed less deformations of conventional EC and EP structures for the action of gravity isolated and from the action of gravity and machining force simultaneously, while the ETD and EOT structures presented the largest deformations. The dynamic simulation results returned higher vibration modes for EC and EP, respectively, and the lowest vibration for ETD. As for the masses of the structures, in ascending order, the results were EC, EP, ET, EOT, EO, and ETD. In conclusion, among the presented geometries, it is possible to obtain the desired stiffness regardless of the structural geometry chosen, however with masses, manufacturing complexities, and different vibration modes that can expressively reflect on the cost-benefit of the structure. Although the structures have been subjected to several optimization iterations cannot rule out the possibility of existing similar structures with smaller mass, volumes, and even with better static and dynamic performances.

**Keywords:** Small size machine tool. Small size multifunctional machine. Design methodology. Precision machining. Ultraprecision machining. Mechanical machine design. Machine tool geometry. Synthetic granite. Finite element analysis.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Classificação da usinagem de ultraprecisão dependendo do material, mecanismo de remoção e processo. ....	19
Figura 1.2 – Desenvolvimento da exatidão de usinagem alcançável .....	20
Figura 2.1 – Fases do processo de projeto de um produto. ....	25
Figura 2.2 – <i>Tetraform 1</i> desenvolvida por Lindsey (1992) no Laboratório Nacional de Física da Inglaterra. ....	29
Figura 2.3 – Octahedral Hexapod Machine.....	29
Figura 2.4 – Projeto CAD da máquina-ferramenta proposta por Bell (2012). ....	30
Figura 2.5 – Máquina-ferramenta de ultraprecisão PicoAce da empresa Loadpoint Limited..	31
Figura 2.6 – Centro de usinagem de ultraprecisão Pyramid Nano da empresa Kern®.....	32
Figura 2.7 – Desenvolvimento de materiais e importância histórica. ....	36
Figura 3.1 – Metodologia de projeto. ....	51
Figura 3.2 – Conceitos geométricos das seis estruturas. ....	54
Figura 3.3 – Conceito estrutura em C (EC). ....	63
Figura 3.4 – Conceito estrutura em pórtico (EP). ....	63
Figura 3.5 – Conceito estrutura tetraédrica (ET). ....	64
Figura 3.6 – Conceito estrutura octaédrica (EO). ....	64
Figura 3.7 – Conceito estrutura tetraédrica dupla (ETD). ....	65
Figura 3.8 – Conceito estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT). ....	65
Figura 3.9 – Tabela de propriedades do granito sintético utilizadas na simulação computacional no Autodesk Fusion 360®.....	66
Figura 3.10 – Tabela de propriedades do material ideal do cabeçote ou <i>spindle</i> (SP) utilizadas na simulação computacional no Autodesk Fusion 360®.....	67
Figura 3.11 – Opções de simulações do Autodesk Fusion 360®.....	68
Figura 3.12 – Projeto da estrutura em C (EC). ....	69
Figura 3.13 – Engastamento na EC. ....	70
Figura 3.14 – Projeto da estrutura pórtico (EP). ....	70
Figura 3.15 – Engastamento na EP.....	71
Figura 3.16 – Projeto da estrutura tetraédrica (ET). ....	72
Figura 3.17 – Engastamento na ET. ....	72
Figura 3.18 – Projeto da estrutura octaédrica (EO). ....	73

Figura 3.19 – Engastamento na EO.....	73
Figura 3.20 – Projeto da estrutura similar a octaédrica mais tetraédrica (EOT). ....	74
Figura 3.21 – Engastamento na EOT. ....	75
Figura 3.22 – Projeto da estrutura tetraédrica dupla (ETD). ....	76
Figura 3.23 – Engastamento na ETD. ....	76
Figura 4.1 – Malha gerada para estrutura em C (EC).....	77
Figura 4.2 – Deformação na estrutura em C (EC) após aplicação de força estática. ....	78
Figura 4.3 – Distribuição de tensão gerada pela aplicação da força estática na estrutura em C (EC).....	79
Figura 4.4 – Deformação gerada pela ação da gravidade na estrutura em C (EC).....	79
Figura 4.5 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade na estrutura em C (EC)...	80
Figura 4.6 – Deformação gerada pela ação da gravidade e da força de usinagem simultaneamente na estrutura em C (EC). ....	80
Figura 4.7 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade e aplicação da força de usinagem simultaneamente na estrutura em C (EC). ....	81
Figura 4.8 – Simulação dinâmica com frequências naturais na estrutura em C (EC). ....	82
Figura 4.9 – Malha gerada para estrutura de pórtico (EP).....	83
Figura 4.10 – Deformação após aplicação de força estática na estrutura pórtico (EP). ....	84
Figura 4.11 – Distribuição de tensão gerada pela aplicação da força estática na estrutura pórtico (EP).....	84
Figura 4.12 – Deformação gerada pela ação da gravidade na estrutura em pórtico (EP). ....	85
Figura 4.13 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade na estrutura em pórtico (EP). ....	85
Figura 4.14 – Deformação gerada pela ação da força de corte mais a gravidade na estrutura em pórtico (EP).....	86
Figura 4.15 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade e aplicação da força de usinagem na estrutura em pórtico (EP).....	86
Figura 4.16 – Simulação dinâmica com frequências naturais na estrutura pórtico (EP).....	87
Figura 4.17 – Malha gerada para estrutura tetraédrica (ET).....	88
Figura 4.18 – Deformação após aplicação de força estática na estrutura tetraédrica (ET). ....	89
Figura 4.19 – Distribuição de tensão gerada pela aplicação da força estática na estrutura tetraédrica (ET). ....	89
Figura 4.20 – Deformação gerada pela ação da gravidade da estrutura tetraédrica (ET).....	90

Figura 4.21 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade da estrutura tetraédrica (ET).....	90
Figura 4.22 – Deformação gerada pela ação da gravidade mais a força de usinagem na estrutura tetraédrica (ET).....	91
Figura 4.23 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade e aplicação da força de usinagem na estrutura tetraédrica (ET).....	91
Figura 4.24 – Simulação dinâmica com frequências naturais na estrutura tetraédrica (ET)....	92
Figura 4.25 – Malha gerada para a estrutura octaédrica (EO).....	93
Figura 4.26 – Deformação após aplicação de força de usinagem na estrutura octaédrica (EO). .....	94
Figura 4.27 – Corte na estrutura octaédrica para análise de deformação após aplicação de força de usinagem (EO). ....	95
Figura 4.28 – Distribuição de tensão gerada pela aplicação da força de usinagem na estrutura octaédrica (EO). ....	95
Figura 4.29 – Deformação gerada pela ação da gravidade na estrutura octaédrica (EO).....	96
Figura 4.30 – Corte na estrutura octaédrica (EO) para análise de deformação pelo efeito da ação da gravidade.....	96
Figura 4.31 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade na estrutura octaédrica (EO). ....	97
Figura 4.32 – Deformação gerada pela ação da gravidade mais a força de usinagem na estrutura octaédrica (EO). ....	97
Figura 4.33 – Corte na estrutura octaédrica (EO) para análise de deformação após a ação da gravidade mais a força de usinagem. ....	98
Figura 4.34 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade e aplicação da força de usinagem na estrutura octaédrica (EO).....	98
Figura 4.35 – Simulação dinâmica com frequências naturais na estrutura octaédrica (EO). ....	99
Figura 4.36 – Malha gerada para a estrutura tetraédrica dupla (ETD).....	100
Figura 4.37 – Deformação após aplicação de força de usinagem na estrutura tetraédrica dupla (ETD).....	101
Figura 4.38 – Corte na estrutura tetraédrica dupla (ETD) para análise de deformação após aplicação da força de usinagem. ....	102
Figura 4.39 – Distribuição de tensão gerada pela aplicação da força de usinagem na estrutura tetraédrica dupla (ETD). ....	102

Figura 4.40 – Deformação gerada pela ação da gravidade na estrutura tetraédrica dupla (ETD).....	103
Figura 4.41 – Corte na estrutura tetraédrica dupla (ETD) para análise de deformação após a ação da gravidade.....	103
Figura 4.42 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade na estrutura tetraédrica dupla (ETD).....	104
Figura 4.43 – Deformação gerada pela ação da gravidade mais a força de usinagem na estrutura tetraédrica dupla (ETD).....	104
Figura 4.44 – Corte na estrutura tetraédrica dupla (ETD) para análise de deformação após a ação da gravidade mais a força de usinagem.....	105
Figura 4.45 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade e aplicação da força de usinagem na estrutura tetraédrica dupla (ETD).....	105
Figura 4.46 – Simulação dinâmica com frequências naturais na estrutura tetraédrica dupla (ETD).....	106
Figura 4.47 – Malha gerada para estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).....	107
Figura 4.48 – Deformação após aplicação de força estática na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).....	108
Figura 4.49 – Corte na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT) para análise de deformação após aplicação de força de usinagem.....	109
Figura 4.50 – Distribuição de tensão gerada pela aplicação da força estática na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).....	109
Figura 4.51 – Deformação gerada pela ação da gravidade na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).....	110
Figura 4.52 – Corte na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT) para análise de deformação após a ação da gravidade.....	110
Figura 4.53 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).....	111
Figura 4.54 – Deformação gerada pela ação da gravidade e da força de usinagem na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).....	111
Figura 4.55 – Corte na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT) para análise de deformação após aplicação de força de usinagem mais a ação da gravidade.....	112
Figura 4.56 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade e aplicação da força de usinagem na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).....	112

Figura 4.57 – Simulação dinâmica com frequências naturais na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT). .....	113
Figura 4.58 – Deformações por ação simultânea da gravidade e força de usinagem nas estruturas analisadas. ....	115

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Arranjos geométricos estruturais mais comuns em máquinas-ferramentas.....	28
Tabela 2.2 – Modos de frequência em estruturas de minimáquina-ferramenta.....	34
Tabela 2.3 – Máquinas não convencionais encontradas na literatura.....	35
Tabela 2.4 – Propriedades de materiais aplicados em máquinas-ferramentas. ....	37
Tabela 2.5 – Propriedades do granito natural. ....	41
Tabela 2.6 – Propriedades típicas de resinas para fabricação de granito sintético.....	43
Tabela 2.7 – Propriedades do granito sintético de acordo com a literatura.....	44
Tabela 3.1 – Propriedades dos materiais utilizados no projeto. Estrutura de granito sintético e cabeçote ou <i>spindle</i> de propriedades mecânicas ideais (rígido e indeformável). ....	55
Tabela 3.2 – Condições adotadas de aplicação de força de usinagem. ....	55
Tabela 3.3 – Análise morfológica da Minimáquina-ferramenta de ultraprecisão estrutura em C (EC).....	57
Tabela 3.4 – Análise morfológica da Minimáquina-ferramenta de ultraprecisão estrutura pórtico (EP).....	58
Tabela 3.5 – Análise morfológica da Minimáquina-ferramenta de ultraprecisão estrutura tetraédrica (ET).....	59
Tabela 3.6 – Análise morfológica da Minimáquina-ferramenta de ultraprecisão estrutura octaédrica (EO).....	60
Tabela 3.7 – Análise morfológica da Minimáquina-ferramenta de ultraprecisão estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT). ....	61
Tabela 3.8 – Análise morfológica da Minimáquina-ferramenta de ultraprecisão estrutura tetraédrica dupla (ETD). ....	62
Tabela 3.9 – Propriedades das malhas.....	68
Tabela 4.1 – Deformações obtidas a partir da simulação estática da estrutura em c (EC).....	78
Tabela 4.2 – Deformações obtidas a partir da simulação estática da estrutura em pórtico (EP). .....	83
Tabela 4.3 – Deformação estática para estrutura tetraédrica (ET). ....	88
Tabela 4.4 – Deformação obtida para a simulação estática para estrutura octaédrica (EO). ...	94
Tabela 4.5 – Deformação estática para estrutura tetraédrica dupla (ETD). ....	101
Tabela 4.6 – Deformação estática para estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT). ....	108

Tabela 4.7 – Deformações obtidas no ponto crítico das estruturas (PCE) na simulação estática. .....	114
Tabela 4.8 – Deformações estáticas máximas nas estruturas analisadas considerando os requisitos de projeto do capítulo 3.2.1, página 53. ....	116
Tabela 4.9 – Maiores tensões obtidas pelo critério de Von Misses na estrutura por meio da simulação estática. ....	117
Tabela 4.10 – Modos de vibração (Hz) das estruturas .....	118
Tabela 4.11 – Comparação mássica, volumétrica e dificuldade de fabricação das estruturas. .....	118

**SIGLAS E ABREVIACÕES**

a	Dilatação térmica
AEF	Análise de Elementos Finitos
Al	Alumínio
$\zeta$	Coeficiente de amortecimento
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
SP	<i>Spindle</i> ou cabeçote
Cp	Calor específico
E	Módulo de elasticidade
EC	Estrutura em C
ECu	Estrutura cubo vazado
EO	Estrutura octaédrica
EP	Estrutura em pórtico
EPir	Estrutura piramidal
ET	Estrutura tetraédrica
ETD	Estrutura tetraédrica dupla
EOT	Estrutura octaédrica mais tetraédrica
k	Coeficiente de transmissão de calor
Li	Lítio
$\sigma_e$	Limite de escoamento
Max	Máximo
Min	Mínimo
PCE	Ponto crítico da estrutura
RMS	<i>Root mean square</i>
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de silício
Ti	Titânio
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
UP	Ultraprecisão



USP	Universidade de São Paulo
$\nu$	Coefficiente de Poisson
X	Amplitude de vibração
Zr	Zircônio
ZAC	Zona afetada pelo calor
$\lambda$	Comprimento de onda
$\sigma_c$	Resistência à compressão
$\sigma_f$	Resistência à flexão
$\sigma_t$	Resistência à tração
$\sigma_0$	Resistência ao cisalhamento
$\rho$	Densidade
$\alpha_0$	Coefficiente de dilatação térmica linear

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1 OBJETIVO.....	22
<b>2 REVISÃO BILIOGRAFICA.....</b>	<b>23</b>
2.1 METODOLOGIA DE PROJETO.....	23
2.2 GEOMETRIAS DE ESTRUTURAS DE MÁQUINAS-FERRAMENTA.....	26
2.3 MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS.....	35
2.3.1 Ferro Fundido.....	38
2.3.2 Aços.....	39
2.3.3 Granito natural.....	40
2.3.4 Granito Sintético.....	42
2.4 PANORAMA DA USINAGEM DE PRECISÃO E ULTRAPRECISÃO.....	48
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>51</b>
3.1 IDENTIFICAÇÃO DA DEMANDA.....	52
3.2 PROJETO CONCEITUAL.....	52
3.2.1 Delimitação do projeto.....	53
3.2.2 Quadro Morfológico.....	56
3.2.3 Conceitos estruturais.....	62
3.3 PROJETO PRELIMINAR.....	66
3.3.1 Materiais.....	66
3.3.2 Simulação Computacional.....	67
3.3.3 Estrutura.....	69
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>77</b>
4.1 ESTRUTURA EM C.....	77
4.1.1 Simulação estática da estrutura em C.....	78

4.1.2 Simulação dinâmica da estrutura em C. ....	82
<b>4.2 ESTRUTURA PÓRTICO .....</b>	<b>83</b>
4.2.1 Simulação estática para estrutura pórtico. ....	83
4.2.2 Simulação dinâmica da estrutura pórtico. ....	87
<b>4.3 ESTRUTURA TETRAÉDRICA.....</b>	<b>88</b>
4.3.1 Simulação estática da estrutura tetraédrica. ....	88
4.3.2 Simulação dinâmica da estrutura tetraédrica.....	92
<b>4.4 ESTRUTURA OCTAÉDRICA.....</b>	<b>93</b>
4.4.1 Simulação estática da estrutura octaédrica. ....	93
4.4.2 Simulação dinâmica para estrutura octaédrica .....	99
<b>4.5 ESTRUTURA TETRAÉDRICA DUPLA .....</b>	<b>100</b>
4.5.1 Simulação estática da estrutura tetraédrica dupla.....	100
4.5.2 Simulação dinâmica da estrutura tetraédrica dupla.....	106
<b>4.6 ESTRUTURA OCTRAÉDRICA MAIS TETRAÉDRICA .....</b>	<b>107</b>
4.6.1 Simulação estática para estrutura octaédrica mais tetraédrica .....	107
4.6.2 Simulação dinâmica da estrutura octaédrica mais tetraédrica.....	113
<b>4.7 COMPARAÇÃO DAS ESTRUTURAS.....</b>	<b>114</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>121</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>123</b>
<b>7 PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS .....</b>	<b>125</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>127</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Definir usinagem de ultraprecisão (UP) não é uma tarefa simples, uma vez que não há consenso e o tema está em constante evolução. Langenbeck<sup>1</sup> (1985, *apud* SCHROETER, 1997 p. 10), por exemplo, define usinagem de UP como trabalho realizado com máquinas no âmbito micrométrico e nos limites tecnológicos da mecânica, enquanto Taniguchi (1983) afirma que este processo ocorre quando foram atingidas as maiores precisões dimensionais em um determinado período de tempo. Segundo Brinksmeier<sup>2</sup> (1994, *apud* SCHROETER, 1997 p. 10) e Bachmann<sup>3</sup> (1994, *apud* SCHROETER, 1997 p. 10), a usinagem de UP é caracterizada por peças com qualidade de forma melhor que 1  $\mu\text{m}$  e rugosidade Ra inferior a 10 nm.

De acordo com Brinksmeier *et al.* (2010) a retificação de UP pode ser compreendida como processo utilizado para a geração de peças com rugosidade superficial  $S_q < \lambda / 100$ , alta precisão de forma  $RMS < \lambda / 10$ , com  $\lambda < 1 \mu\text{m}$ , e alta integridade da superfície, com  $\lambda$  sendo o comprimento de onda eletromagnética. Geralmente os materiais dúcteis são usinados por ferramentas de geometria definida, como apresentado na Figura 1.1, sendo estes processos muito bem compreendidos e determinísticos. Essas características tornam a usinagem UP com aresta definida excelente base de comparação para definir conceitos acerca da retificação de UP.

Figura 1.1 – Classificação da usinagem de ultraprecisão dependendo do material, mecanismo de remoção e processo.

Material	Dúctil	Duro	
Princípio da remoção de material	Corte (Modo dúctil)		Usinagem abrasiva (Modo frágil/dúctil)
Processos de usinagem	Usinagem Convencional <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fresamento</li> <li>• Torneamento</li> </ul>	<b>Usinagem de ultraprecisão</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fresamento UP</li> <li>• Torneamento UP</li> <li>• Torneamento Duro</li> <li>• Retificação UP</li> <li>• Lapidação</li> <li>• Polimento óptico</li> </ul>	
			Usinagem convencional <ul style="list-style-type: none"> <li>• Retificação</li> <li>• Brunimento</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Fiocchi, 2014; após Brinksmeier *et al.*, 2010.

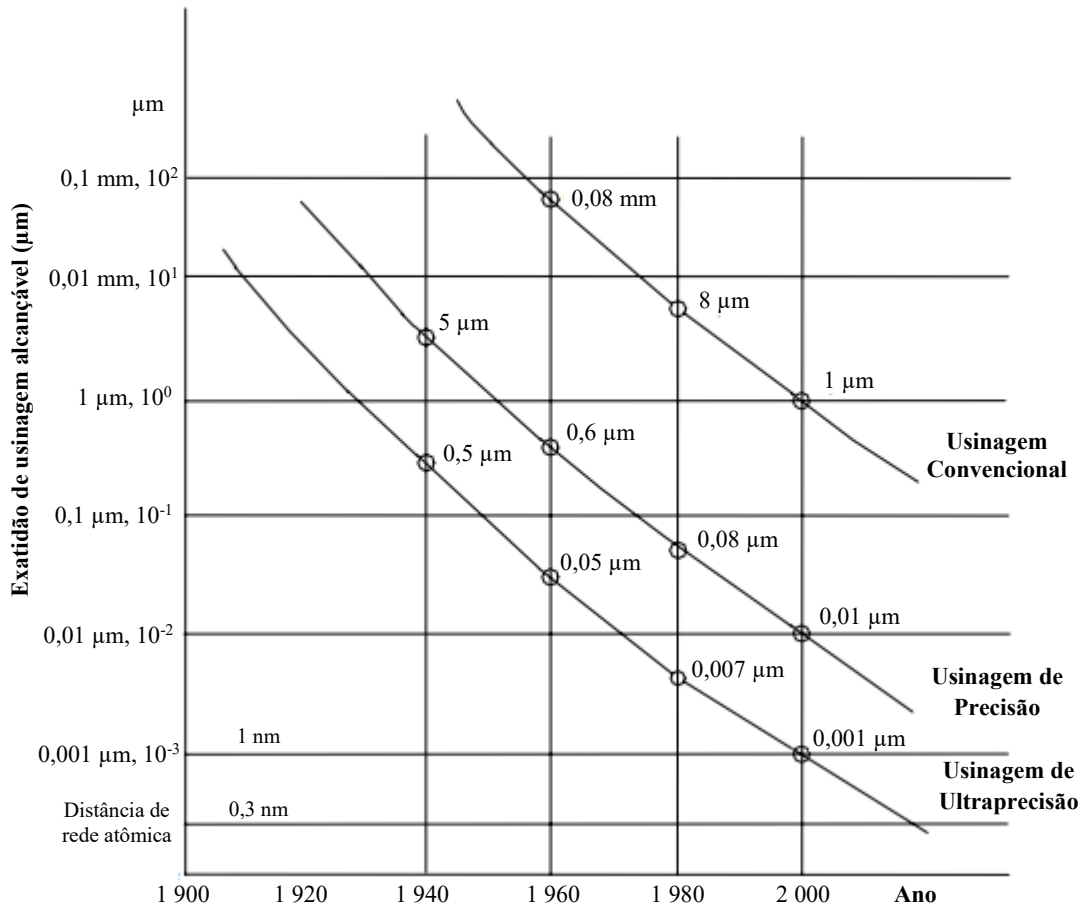
<sup>1</sup>LANGENBECK, P. Entw icklungsstand der U ltrapräzisionstechnik am B eispiel der M ikrozerspanung. **Anläßlich des Treffens am 15/10/85 im WZL/IPT Aachen.** Gründung Forschungsgemeinschaft Ultrapräzisionstechnik, 1985. 20 p.

<sup>2</sup>BRINKSMEIER, E. **Herstellung von Präzisionsbauteilen durch Mikrozerspanung. Sonderdruck aus IDR** Industrie Diam anten Rundschau 28 (1994) Nr. 4. 8 p.

<sup>3</sup>BACHMANN, G. Nanotechnologie. **VDI-Technologiezentrum**, Düsseldorf, 1994.

A partir da curva de Tanigushi, apresentada inicialmente no trabalho de Taniguchi (1983) e atualizada posteriormente por Lee *et al.* (2006) verifica-se a evolução dos processos quanto a exatidão dimensional alcançável. Na Figura 1.2 é representada a curva de Tanigushi.

Figura 1.2 – Desenvolvimento da exatidão de usinagem alcançável.



Fonte: Adaptado de Lee *et al.*, 2006; após Tanigushi, 1983; tradução livre.

É possível verificar que a partir do desenvolvimento de distintas tecnologias de UP não só se tem elevado a confiabilidade dos produtos que já existiam, como também tem possibilitado o desenvolvimento de novos produtos. Câmeras digitais, equipamentos médicos minimamente invasivos, equipamentos biotecnológicos ou de processamento químico são exemplos de aplicação da usinagem UP (LUO *et al.*, 2005). A usinagem de UP tem grande importância também no setor óptico de produção de lentes e espelhos (SCHROETER, 1997).

Oliveira (2009) afirma que a demanda por *chips* cada vez menores incentivou o desenvolvimento do processo de corte abrasivo de precisão tornando possível a elaboração de peças mais precisas, pequenas e de qualidade.

O trabalho de Brinksmeier *et al.* (2010) apresenta uma definição e introdução ao processo de retificação de UP, discutindo sobre a relevância deste processo para a indústria óptica e eletrônica. Enquanto Zhang *et al.* (2019) apresentam um estudo do estado da arte referente a usinagem de UP, que também reforça as aplicações do processo, mencionando possibilidades de aplicações como os da área de biomedicina e bioengenharia, além de expor a necessidade de desenvolvimento de sistema para fabricação em larga escala de superfícies funcionais microestruturadas.

Dentre a crescente aplicação do processo de UP destaca-se a fabricação de superfícies otimizadas ou funcionalizadas que propiciam, por exemplo, troca de calor superior em superfícies com menores rugosidades pela elevação da área de contato, abrindo um leque de possibilidades de aplicações da usinagem de UP (WANG *et al.*, 2014).

Alguns exemplos de materiais que estão se tornando importantes para fabricação de microcomponentes são os vidros, cerâmicas avançadas, polímeros, metais e ligas metálicas. Na indústria eletrônica o silício é um dos materiais mais usinados (LUO *et al.*, 2005).

A seleção de materiais para serem aplicados na fabricação dos componentes de máquinas ferramentas de UP tem possibilitado grandes avanços quanto a precisão destes equipamentos, dito que estes influenciam fortemente o desempenho mecânico estático, dinâmico e térmico dos equipamentos e dispositivos de usinagem. A introdução do granito sintético é um exemplo de material compósito com algumas propriedades superiores aos aços, ferros fundidos e ligas de alumínio tradicionalmente aplicados em estruturas de máquinas de UP.

Outra particularidade dos equipamentos de UP que vem sendo estudado e tem gerado avanços significativos no desempenho global é a geometria da estrutura, a qual tradicionalmente se encontra na forma de coluna, em I ou pórtico. Outras geometrias como a tetraédrica e a piramidal têm possibilitado um aumento significativo na rigidez das máquinas com redução de massa da estrutura. Brinksmeier *et al.* (2010) reforçam a importância do estudo referente ao projeto geométrico da estrutura na qualidade dos resultados dos processos de usinagem de UP.

Durante o desenvolvimento do projeto da estrutura de uma máquina-ferramenta de precisão deve-se considerar algumas questões como a rigidez estática e dinâmica, estabilidade térmica, sua configuração estrutural e sua conectividade com demais componentes para que se possa alcançar a precisão desejada (CHEN *et al.*, 2015).

Uma ferramenta que vem sendo aprimorada e aplicada pelos projetistas no desenvolvimento de novos equipamentos são os softwares de Análise de Elementos

Finitos (AEF), permitindo que os projetos sejam realizados em menor tempo e com uma maior complexidade geométrica e de materiais (CHAPMAN, 2004).

Dada a contínua demanda tecnológica por processos de usinagem e máquinas-ferramentas de ultraprecisão cada vez mais determinísticos quanto aos resultados de integridade do material usinado, que frequentemente são de difícil usinagem, e tolerâncias dimensionais e geométricas mais estreitas, o estudo da geometria associada a material da estrutura tem recebido constante atenção da indústria e pesquisadores com o intuito de alcançar máquinas de melhor desempenho.

## 1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é o projeto mecânico preliminar de estruturas de minimáquinas-ferramentas multifuncionais de precisão aplicando metodologia de projeto de engenharia avaliando diferentes geometrias estruturais de granito sintético, visando projetos melhorados quanto à rigidez, massa, dimensão, geometria, volume de trabalho e aspectos favoráveis e desfavoráveis da sua manufatura. Os desempenhos das estruturas foram comparados em simulações computacionais empregando o programa *Fusion 360*<sup>®</sup> por meio de análise de elementos finitos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

A revisão bibliográfica está dividida em quatro partes, sendo elas: metodologia de projeto, geometrias das estruturas, materiais de construção e panorama da usinagem de precisão e UP.

A metodologia de projeto, presente no capítulo 2.1, tem como foco guiar as decisões pertinentes ao projeto e sua organização.

O estudo do estado da arte das máquinas-ferramentas com relação a sua geometria possibilita a escolha adequada da estrutura voltada à aplicação esta é apresentada no capítulo 2.2, no qual são apresentadas a estrutura coluna (EC), estrutura portal (EP), estrutura tetraédrica (ET), estrutura tetraédrica dupla (ETD), estrutura octaédrica (EO) e a estrutura octaédrica com a tetraédrica (EOT).

Os materiais de engenharia aplicados às estruturas desses equipamentos são de fundamental importância para alcançar o desempenho de projeto. No capítulo 2.3 são apresentados alguns materiais de engenharia e suas propriedades visando estruturas de máquinas-ferramentas de precisão.

O estudo do panorama da usinagem de precisão e UP, apresentada no capítulo 2.4, é imprescindível para a análise do projeto pois tem como objetivo nortear a pesquisa desenvolvida, destacando alguns fabricantes de máquinas-ferramentas de UP, pesquisadores, laboratórios e centros de pesquisa importantes para a manufatura de UP.

### 2.1 METODOLOGIA DE PROJETO

Muitos dos problemas práticos e mais simples são resolvidos utilizando métodos heurísticos, ou seja, com base em experiências anteriores, com resultados considerados satisfatórios. Porém, para projetos de engenharia complexos é fundamental a escolha de procedimentos metodológicos e sistemáticos para se obter melhores soluções (PEREIRA, 2016).

O procedimento metodológico vai desde a identificação de um dado problema até sua solução final, englobando toda a forma de desenvolvimento do projeto. Caso seja realizado de modo a criar um mapa de passos a serem executados e delimitando as questões mais importantes, a metodologia auxiliará o projetista a alcançar as melhores soluções (MARIBONDO, 2000).



Vale ressaltar que a metodologia de projeto auxilia aos projetistas no trabalho de desenvolvimento de soluções para problemas de projeto (MARIBONDO, 2000). Os projetos que fazem uso de ferramentas de estudo de viabilidade técnica e econômica possuem 2,4 vezes mais chance de sucesso, enquanto produtos dimensionados previamente a sua execução têm 3,3 vezes mais chances de serem bem-sucedidos. Deste modo, ferramentas de metodologia de projeto são de fundamental importância para que um projeto seja bem realizado (BAXTER, 1998).

Deve-se notar que todo o procedimento metodológico está correlacionado ao ciclo de vida do produto. A demanda pode surgir a partir de uma necessidade do mercado ou a partir de uma nova ideia; isso dá início à elaboração de uma solução para suprir a dada demanda, terminando com a reciclagem ou o descarte ambientalmente seguro (PAHL e BEITZ, 1996).

De acordo com Pereira (2004), cada projeto terá seu conjunto equivalente de atividades distintas que devem ser realizadas para garantir a qualidade final do produto. Normalmente, diagramas de fluxo auxiliam na delimitação das fases do projeto de modo a caracterizá-las por conclusões de resultados ou saídas esperadas de cada fase, deixando, portanto, mais explícita a transição das etapas de projeto.

Ressalta-se que o termo projeto neste trabalho está relacionado a projeto mecânico de engenharia.

Pereira (2016) apresenta levantamento bibliográfico organizado em tabela referente à metodologia de projeto visando a compreensão das diversas alternativas que podem ser utilizadas na organização de projetos, de modo a otimizar o seu desenvolvimento.

Pahl e Beitz (1996) propõem um processo de projeto dividido em quatro fases, sendo a primeira o planejamento do produto e esclarecimento da tarefa, a segunda o desenvolvimento de um projeto conceitual, a terceira o projeto preliminar e a quarta o detalhamento do projeto. A primeira fase tem como objetivo coletar informações, requisitos e ideias relativas ao projeto. Na segunda fase delimita-se os princípios referentes ao trabalho, gerando-se propostas estruturais e conceituais. Na terceira etapa há a elaboração de um esboço preliminar do trabalho, buscando a convergência de decisão na quarta e última etapa.

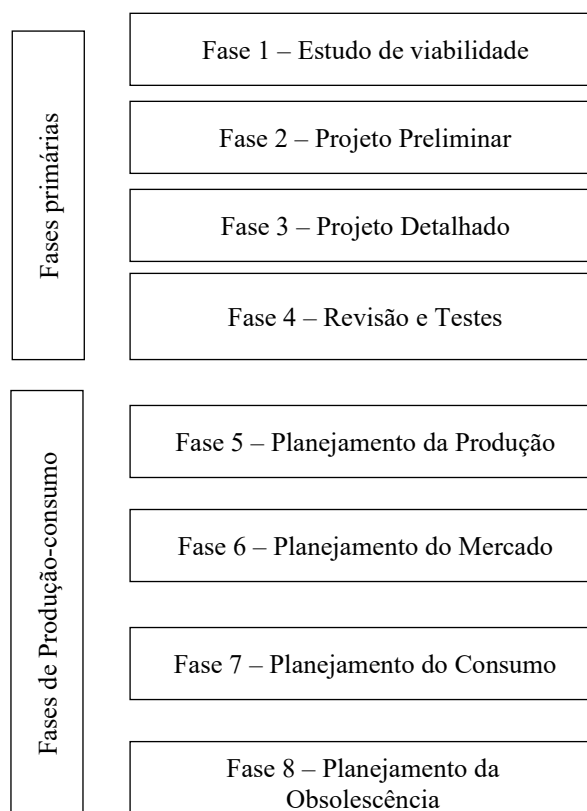
Back<sup>1</sup> (1983 *apud* ARAUJO, 2009 p.23) propõe um modelo morfológico para o desenvolvimento de um projeto, sendo composto por oito fases que podem ser divididas em

---

<sup>1</sup> Back, N. **Metodologia de projeto de produtos industriais**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1983.

fases primárias e fases relacionadas ao ciclo de produção e consumo. Esses modelos são resumidos na Figura 2.1, como exemplo para delimitação de fases para um projeto.

Figura 2.1 – Fases do processo de projeto de um produto.



Fonte: adaptado de Back<sup>1</sup>, 1983, *apud* Araujo, 2009, p.23.

Outro estudo de destaque referente à metodologia é o de Blanchard e Fabrycky (1998) que divide o processo de projeto em sete fases: a primeira é a identificação da demanda, seguida pelo projeto conceitual, projeto preliminar, projeto detalhado, produção e construção, utilização e suporte, finalizando com o descarte.

O projeto se inicia pela identificação de uma necessidade, seja ela por falta ou por desejos referentes ao sistema. A partir deste ponto inicia-se a elaboração de um projeto conceitual onde são avaliados a viabilidade, requisitos operacionais, concepção da manutenção e planejamento avançado do sistema (BLANCHARD e FABRYCKY, 1998).

O projeto preliminar é onde se realiza a análise funcional do sistema, síntese preliminar e alocação de critérios de projeto, aperfeiçoamento do sistema, definição e a síntese do sistema.

<sup>1</sup> Back, N. **Metodologia de projeto de produtos industriais**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1983.

Já na fase denominada de projeto detalhado tem-se o projeto do produto do sistema, o desenvolvimento do protótipo do sistema e os testes e avaliações do que foi elaborado (BLANCHARD e FABRYCKY, 1998).

A partir da fase de produção e construção até a de descarte sugerida por Blanchard e Fabrycky (1998), as medidas tomadas são mais voltadas às modificações para ações corretivas.

Os avanços tecnológicos têm gerado contribuições significativas nas metodologias de projeto a exemplo das ferramentas denominadas de *Computer Aided Design (CAD)* e *Computer Aided Engineering (CAE)*, as quais auxiliam na execução das tarefas de projeto de forma computacional, permitindo realizar projetos mais complexos e específicos em menor tempo (PAHL e BEITZ, 1996).

## 2.2 GEOMETRIAS DE ESTRUTURAS DE MÁQUINAS-FERRAMENTA

Além da correta seleção dos parâmetros de corte, materiais de ferramenta, geometrias das ferramentas de corte e dos processos de remoção, destaca-se que as escolhas da geometria, materiais e o projeto estrutural das máquinas-ferramentas têm forte influência na qualidade da usinagem, sendo considerados como um grande divisor de águas em termos de projeto de máquina de desempenho melhorado (MÖHRING *et al.*, 2015; YU *et al.*, 2010; STOETERAU, 2004; KHALID e MEKID, 2006).

Processos de usinagem que empregam fonte mecânica de energia para remoção de material estão sujeitos a forças de corte variáveis em módulo, direção e sentido, além de mais de 80 % da energia mecânica convertida em térmica (COSTA, 2019). Esses processos são dinâmicos e as estruturas mecânicas da máquina devem dissipar, passivamente ou ativamente, as vibrações internas e externas aos processos de usinagem. O controle térmico também é fundamental na mecânica de precisão e, principalmente, na manufatura de UP (STEPHENSON e AGAPIOU, 2016).

A partir do projeto e estudo estrutural desses equipamentos é possível determinar a rigidez mecânica por meio de técnicas experimentais ou computacionais, destacando-se neste a Análise de Elementos Finitos (AEF).

Chen (2016) apresenta o projeto de uma máquina ferramenta utilizando AEF onde suas guias lineares possuem rigidez de 1 000 N/ $\mu\text{m}$  na horizontal e 3 000 N/ $\mu\text{m}$  na vertical. As análises estática e dinâmica por elementos finitos possibilitaram a comparação entre a aplicação do granito sintético e a do ferro fundido.

PARK *et al.* (2009) utilizaram da AEF para verificar as características estruturais de um equipamento durante seu projeto, visando um layout estrutural adequado para microusinagem em grandes superfícies. Este equipamento apresentou uma rigidez no eixo X de 876 N/ $\mu$ m na horizontal e 1 030 N/ $\mu$ m na vertical, o eixo Y apresentou 1 010 N/ $\mu$ m na horizontal e 1 348 N/ $\mu$ m na vertical e o eixo Z apresentou 675 N/ $\mu$ m na horizontal e 1 350 N/ $\mu$ m na vertical.

De acordo com Mohring (2015), a estrutura da máquina é um componente essencial para o sistema de usinagem, pois garantirá a configuração geométrica dos elementos da máquina sobre cargas estáticas, dinâmicas e térmicas, dissipando qualquer efeito perturbador do processo de usinagem.

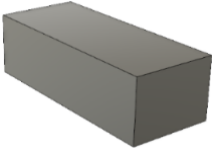



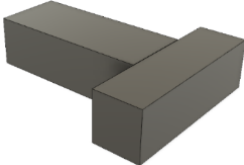



Segundo Erbe, Król e Theska (2008) a seleção de um coeficiente de segurança adequado para o projeto é de suma importância, recomenda-se a utilização de um fator superior a 4 para o projeto utilizando o material granito sintético e em estruturas solicitadas dinamicamente (ERBE, KRÓL e THESKA, 2008).

Cerca de 80 % dos custos de um projeto são definidos durante a fase do projeto conceitual e preliminar, sendo que uma das principais características definidas nesta fase é a escolha de uma estrutura adequada para o equipamento (BRADLEY e ANNA, 1998). A estrutura possui um papel fundamental para que seja possível manter a velocidade de usinagem, precisão e produtividade, tornando a seleção dessa um fator relevante ao projeto (YU *et al.*, 2010).

Os arranjos de estruturas utilizadas em máquinas-ferramentas são dependentes da cinemática do processo, opção construtiva da máquina e dos limites dos processos de fabricação quanto aos materiais e estruturas que serão empregados. Na Tabela 2.1 são ilustrados e nomeados os arranjos mais comuns de estruturas de máquinas-ferramentas (STOETERAU, 2004).

A escolha por estruturas de malha fechada e estruturas com laço estrutural, apresentando características simétricas são amplamente utilizadas em projetos de máquinas-ferramentas de precisão. São exemplos de estruturas com malha fechada a ET proposta pelo Laboratório Nacional de Física da Inglaterra e a EPIR da empresa Loadpoint (HUO e CHENG, 2008).

Tabela 2.1 – Arranjos geométricos estruturais mais comuns em máquinas-ferramentas.

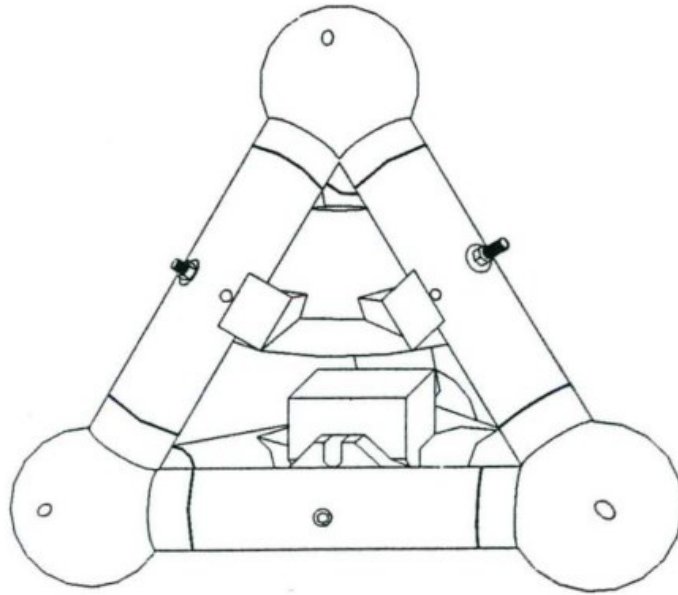
Estrutura Simples (ES)	Estrutura L (EL)	Estrutura C (EC)
		
Estrutura Piramidal (EPIR)	Estrutura T (ETe)	Estrutura Tetraédrica (ET)
		
Estrutura de Cubo Vazado (ECU)	Estrutura Portal (EP)	
		

Fonte: adaptado de Stoeterau, 2004.

De acordo com Corbett *et al.*<sup>1</sup> (1999 *apud* STEPHENSON, *et al.*, 2001), o Laboratório Nacional de Física da Inglaterra desenvolveu a partir de um projeto elaborado por Lindsey (1992) um equipamento utilizando a ET, contendo todas as cargas transportadas em uma estrutura fechada denominada *Tetraform*, apresentada na Figura 2.2. Esse equipamento possui uma área horizontal de trabalho de 220 mm por 120 mm e rigidez que possibilita gerar um acabamento em superfícies metálicas duras com qualidade óptica, podendo apresentar uma repetibilidade de movimento inferior a 10 nm quando aplicado a uma profundidade de corte de até 500  $\mu\text{m}$ , porém com uma maior complexidade estrutural e um maior custo relativo de fabricação se comparada as estruturas tradicionais.

<sup>1</sup> Corbett J, Stephenson DJ, Sweet J, Wills-Moren WJ. **An ultra-stiff machine tool demonstrating a novel vibration resistant structure.** In: Proc. 1st Int. euspen Conf, Bremen, Germany, Shaker Verlag, 1999.

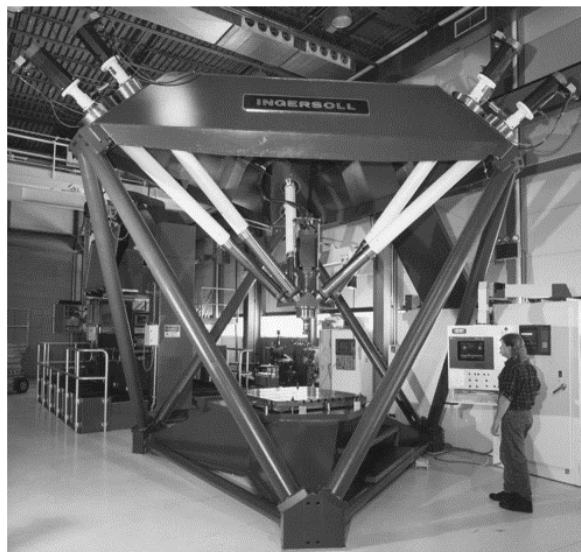
Figura 2.2 – *Tetraform 1* desenvolvida por Lindsey (1992) no Laboratório Nacional de Física da Inglaterra.



Fonte: Stoeterau, 1999.

A geometria da fresadora denominada de *Octahedral Hexapod Machine*, proposta pela empresa Ingersoll Milling Company e apresentada na Figura 2.3, baseia-se na movimentação da ferramenta a partir de seis fusos em mecanismo denominado de cinemática de barras paralelas, promovendo seis graus de liberdade à ferramenta. Uma das vantagens dessa cinemática reside nas maiores velocidades e acelerações na translação da ferramenta dada o acionamento simultâneo dos motores dos eixos (STEPHENSON e AGAPIOU, 2016).

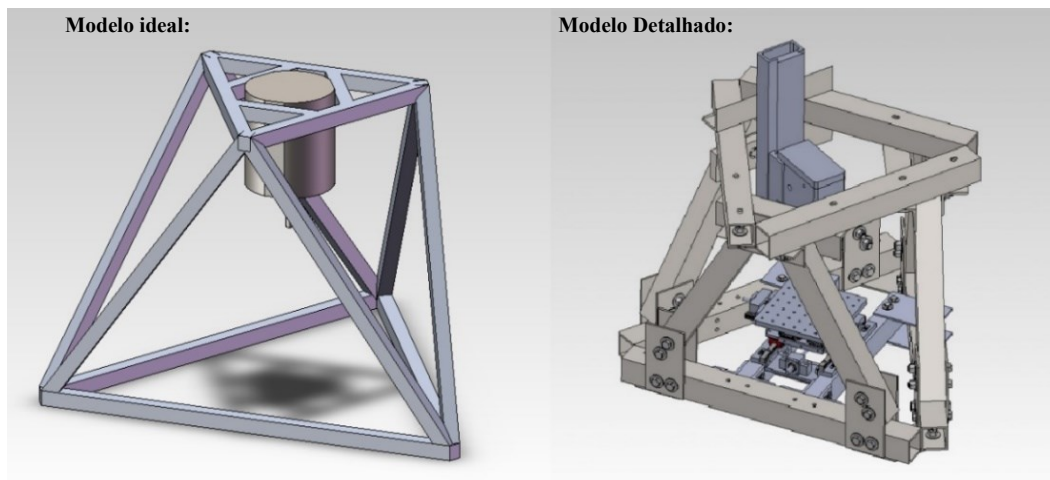
Figura 2.3 – *Octahedral Hexapod Machine*.



Fonte: Stephenson e Agapiou, 2016.

A máquina-ferramenta proposta por Bell (2012) é apresentada na Figura 2.4. Essa geometria é baseada na ET e tem como intuito distribuir as forças de usinagem em semiestruturas triangulares. Nesse trabalho foi desenvolvido um protótipo virtual no programa Solidworks® para verificar a interferência entre os componentes, além de realizar simulações para definir o desempenho mecânico da estrutura.

Figura 2.4 – Projeto CAD da máquina-ferramenta proposta por Bell (2012).



Fonte: Bell, 2012.

Bell (2012) verificou problemas inerentes à vibração durante a usinagem que ocorreram por conta da seleção de materiais e ligações mecânicas dos componentes estruturais. Dentre as soluções propostas foi apontado a substituição dos perfis estruturais de aço interconectados por flanges e parafusos por uma estrutura monolítica de granito sintético.

A máquina-ferramenta de ultraprecisão PicoAce da empresa Loadpoint Limited, mostrada na Figura 2.5, apresenta uma EPIR que oferece uma rigidez de laço estrutural estática e dinâmica elevada quando comparada as estruturas convencionais do tipo EL, EC e EP (HUO e CHENG, 2008). O equipamento é capaz de alcançar acabamentos na faixa de 1 nm a 5 nm de Ra na retificação de cerâmicas e componentes ópticos, com desempenho comparado ao da *Tetraform* de Lindsey (MACHINERY, 2004).

Figura 2.5 – Máquina-ferramenta de ultraprecisão PicoAce da empresa Loadpoint Limited.



Fonte: Machinery, 2004.

A empresa LT Ultra produz tornos e fresadores de UP. Os tornos podem alcançar até 10 000 rpm e os cabeçotes das fresadoras 100 000 rpm. (LT ULTRA, 2022).

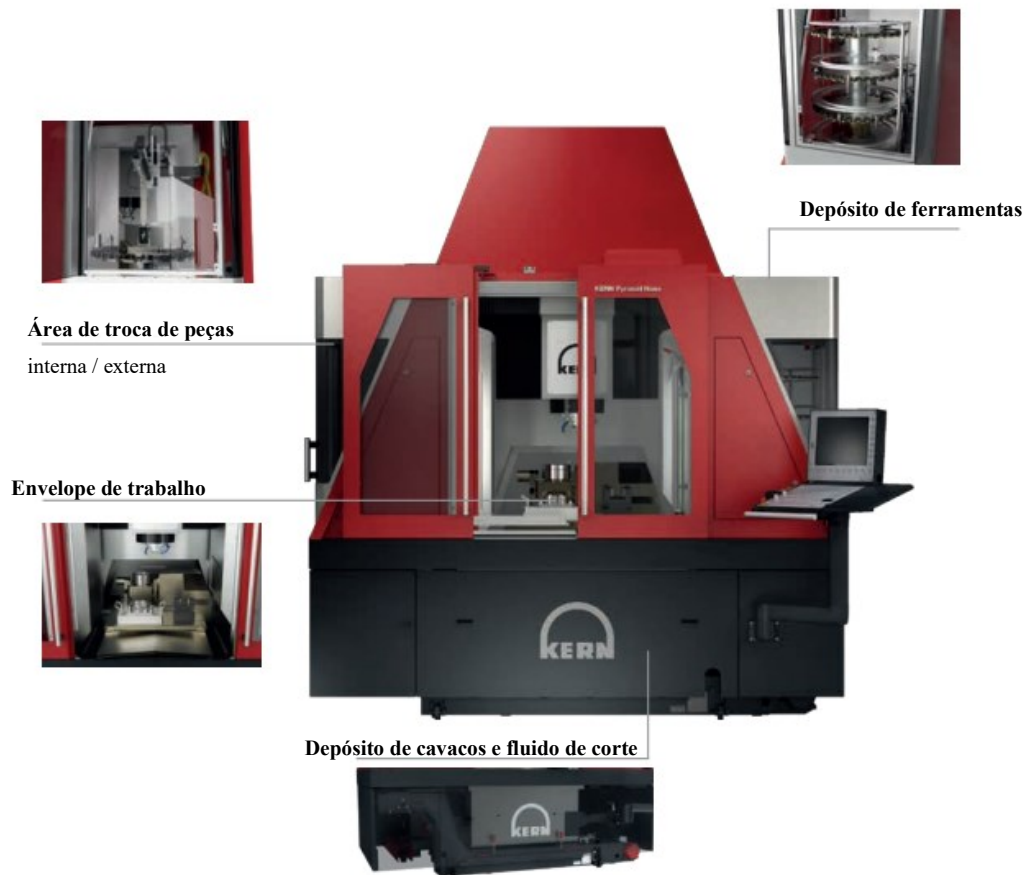
A análise do efeito da variação da geometria de uma máquina-ferramenta de UP realizada por Chen (2015) leva em conta o desempenho térmico, dinâmico e de rigidez avaliando quatro geometrias, sendo elas EC, EPIR, EP e ES em um volume de trabalho de 150 mm de diâmetro por 150 mm de comprimento com o intuito de usinar componentes ópticos esféricos, anesféricos e de geometrias livres de carboneto de silício e aço endurecido. Chen (2015) concluiu que a geometria portal era a mais indicada para essa aplicação. A geometria coluna não foi comparativamente indicada para a usinagem de UP.

A Kern Pyramid Nano mostrada na Figura 2.6 apresenta EP e foi desenvolvida para processos de usinagem que demandam qualidade de UP, alcançando exatidão de posicionamento da ferramenta inferior a 1,5  $\mu\text{m}$ , repetibilidade inferior a 1  $\mu\text{m}$  e envelope de trabalho de 500 mm no eixo X, 500 mm no eixo Y e uma altura máxima de 400 mm no eixo Z. Capaz de alcançar 42 000 rpm em seu cabeçote e estrutura de granito sintético registrado de Kern Armorith<sup>®</sup> de desenvolvido próprio (KERN, 2020).

Os centros de usinagem da Kern<sup>®</sup> apresentam cabeçotes com rotações típicas entre 32 000 rpm e 52 000 rpm (KERN, 2020).



Figura 2.6 – Centro de usinagem de ultraprecisão Pyramid Nano da empresa Kern®.



Fonte: adaptado de Kern, 2020.

O tamanho é outro aspecto relevante das máquinas-ferramentas que deve ser considerado no projeto e aplicação (KAWAHARA *et al.*, 1997).

Dentre as várias vantagens citadas por Khalid e Mekid (2006) com relação as micromáquinas, destacam-se a redução da amplitude de vibração pela redução da massa, diminuição da força de usinagem, redução do efeito térmico, diminuição do consumo de matéria prima para sua confecção e maiores velocidades de corte. Assim, a precisão das micromáquinas melhora com as reduções inerentes à inércia dos componentes da máquina, desvios térmicos e maiores frequências atuantes no sistema. Ademais, o consumo de energia de uma minimáquina é reduzido em comparação a uma meso ou macromáquina executando uma mesma atividade (KAWAHARA *et al.*, 1997).

Nas macromáquinas ou máquinas de grande porte a primeira frequência natural da estrutura é tradicionalmente maior do que as frequências inerentes ao processo de remoção. Por outro lado, nas minimáquinas e máquinas que operam a rotações superiores a 10 000 rpm (alcançando até 1 000 000 rpm), por exemplo, o microfresamento de UP, as frequências de

excitação da estrutura podem ser superiores a 4 000 Hz. Consequentemente, os resultados da análise modal fornecem um guia de seleção de frequências de operação da máquina ao invés de um limite para a frequência de operação (HUO , CHENG e WARDLE (2010); LI, LI e YANG, (2017); PARK, PARK e LIANG (2011).

Durante o torneamento de UP, por exemplo, podem ser medidas diferentes frequências no espectro de vibração do sistema, as quais podem ser agrupadas em componentes de baixa, média, alta e ultra alta frequências, variando de dezenas de Hz a dezenas de kHz. As principais vibrações que afetam o desempenho global dos processos mecânicos de usinagem atuam na ferramenta, suporte da ferramenta, peça e material em usinagem, cabeçote, sistemas de fixação e sistemas de movimentação (ZHANG e TO, 2013; ZHANG *et al.*, 2012; ZHANG *et al.*, 2015).

No torneamento de UP com ferramenta de diamante foi verificado que a vibração da ferramenta afeta o perfil de rugosidade da peça. A magnitude dos picos e vales e os afastamentos são proporcionais a rotação da peça e avanço de corte da ferramenta (KIM, CHANG e KIM, 2002).

A força de corte afeta diretamente na amplitude dos picos e vales na superfície usinada, de modo que quanto maior a força, maiores serão as amplitudes, sendo assim uma possibilidade de redução do efeito da vibração é reduzir a força de corte (ZHANG *et al.* 2012).

Na Tabela 2.2 são agrupadas informações relativas aos modos de frequência das estruturas em função dos autores, processo de usinagem e geometria da minimáquina-ferramenta.

Tabela 2.2 – Modos de frequência em estruturas de minimáquina-ferramenta.

<b>Autor</b>	<b>Processo de usinagem</b>	<b>Estrutura do equipamento</b>	<b>1° modo (Hz)</b>	<b>2° modo (Hz)</b>	<b>3° modo (Hz)</b>	<b>4° modo (Hz)</b>	<b>5° modo (Hz)</b>	<b>6° modo (Hz)</b>	<b>7° modo (Hz)</b>	<b>8° modo (Hz)</b>
(HUO, CHENG e WARDLE, 2010)	Microfresamento UP	EP	129	142	231	292	344	362	378	405
(HUO, CHENG e WARDLE, 2010)	Microfresamento UP	EC	117	142	159	165	212	268	299	319
(LI, YANG e LI, 2016)	Microretificação UP	EC	179	239	344	356	413	444	497	557
(AHMAD e JAGADEESHA, 2021)	Torneamento	ES	369	469	808	837	925	1 288	1 364	1 468
(LI, LI e YANG, 2017)	Microretificação UP	EC	281	403	617	753	854	949	-	-
(LI, LI e YANG, 2017)	Microretificação UP	EC	327	448	683	785	895	1012	-	-
(PARK, PARK e LIANG, 2011)	Microfresamento UP	EC	417	438	921	1 096	-	-	-	-
(PARK, PARK e LIANG, 2011)	Microfresamento UP	EC	376	394	907	1 026	-	-	-	-
(PARK, PARK e LIANG, 2011)	Microfresamento UP	EC	336	349	890	946	-	-	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Huo, Cheng e Wardle, 2010; Li, Yang e Li, 2016; Ahmad e Jagadeesha, 2021; Li, Li e Yang, 2017; Park, Park e Liang, 2011.

E possível verificar muitas possibilidades e informações não restritas ao ambiente científico devido a geração de “*makers*” e divulgação em redes sociais de geometrias, materiais, métodos de moldagem, muitas vezes realizados de maneira não convencional e caseira, e até mesmo disponibilizados por empresas para divulgação em plataformas virtuais como o *Youtube* ou *blogs*. Na Tabela 2.3 são listadas algumas das máquinas encontradas nessas plataformas.

Tabela 2.3 – Máquinas não convencionais encontradas na literatura.

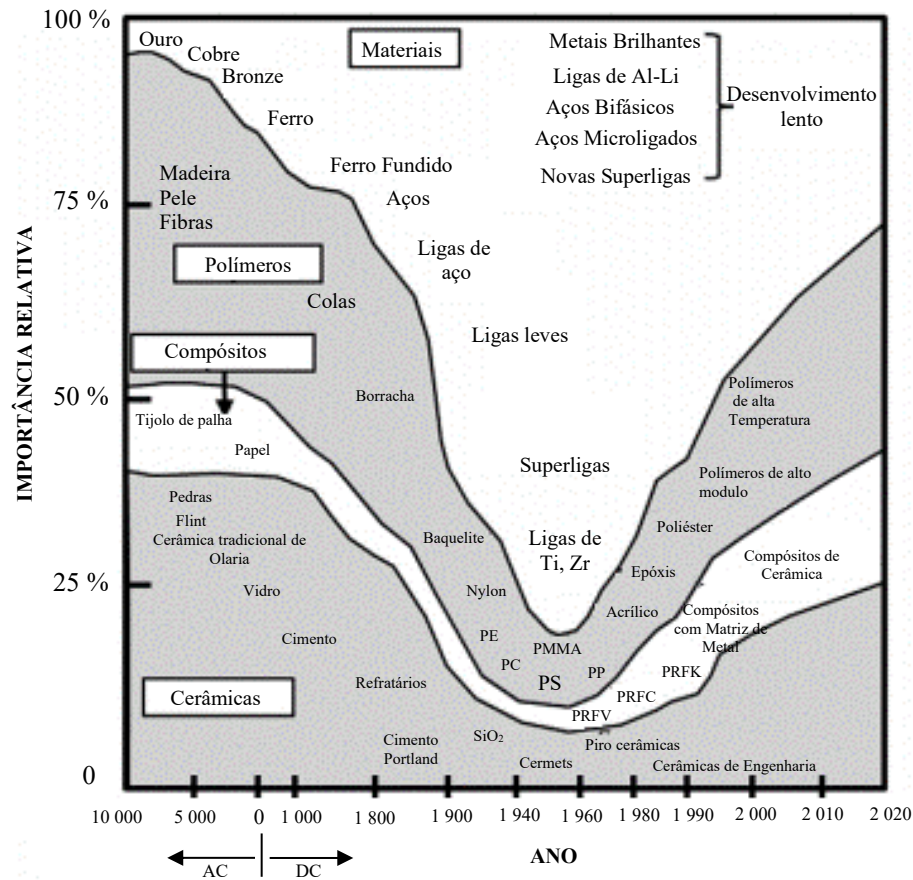
<b>Autor/Data</b>	<b>Tipo de Máquina</b>	<b>Material da Estrutura da Máquina</b>	<b>Tipo de Estrutura</b>	<b>Processo de Fabricação da Estrutura</b>
(FILIPOWSKI, 2016)	Torno	Concreto Civil	Simples	Moldes de compensado
(HEGNER, 2015)	Fresadora	Granito Sintético	Pórtico	Moldes de compensado com insertos metálicos
(CLEBREAK, 2018)	Fresadora	Alumínio	Pórtico	Conformação mecânica
(RAMSWARNAK, 2019)	Torno	Concreto Civil	Simples	Moldes de compensado
(BEIGANG, 2019)	Fresadora	Granito Sintético	Coluna	Moldes de compensado com insertos metálicos.
(WYSOCKI, 2019)	Fresadora	Granito Natural	Pórtico	Conformação mecânica

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Filipowski, 2016; Hegner, 2015; Clebreak, 2018; Ramswarnak, 2019; Beigang, 2019; e Wysocki, 2019.

## 2.3 MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS

A seleção dos materiais é de grande importância, pois interfere no comportamento térmico e mecânico da estrutura da máquina, além de afetar diretamente o custo de produção. Algumas propriedades importantes são: o módulo de Young ( $E$ ), resistência ao cisalhamento ( $\sigma_0$ ), resistência à flexão ( $\sigma_f$ ), resistência à tração ( $\sigma_t$ ), resistência à compressão ( $\sigma_c$ ), amortecimento do material ( $\zeta$ ), densidade ( $\rho$ ), condutividade térmica ( $K$ ), calor específico ( $C_p$ ) e coeficiente de dilatação térmica linear ( $\alpha_0$ ) (MÖHRING *et al.*, 2015). Na Figura 2.7 é apresentada o desenvolvimento e importância histórica relativa dos materiais.

Figura 2.7 – Desenvolvimento de materiais e importância histórica.



Fonte: Adaptado de Dobrzański, 2006; após Ashby, 1992; Waterman, 1997; Dobrzański, 2002 e Dobrzański, 2004.

Heitmann e Venkatraman<sup>1</sup> (1970, apud LINTZ, 2003) empregaram o concreto armado em estrutura de máquina-ferramenta. Koblischek<sup>2</sup> (1987, apud LINTZ, 2003) apresentou a possibilidade do granito sintético e Chua *et al.*<sup>3</sup> (1987, apud LINTZ, 2003) a aplicação de argamassa reforçada com fibras.

Na Tabela 2.4 são apresentadas algumas propriedades dos materiais empregados nas estruturas de máquinas-ferramentas.

<sup>1</sup> HEITMANN H. AND E VENKATRAMAN V.. **Investigation on the Use of Prestressed and Reinforced Concrete as Material for Machine Tool Structures.** In Proceedings of the 4<sup>th</sup> All India Conference on Machine Tools Design and Research, IIT Madras, India, 1970.

<sup>2</sup> KOBLSICHEK, P.J. **Motema - AC the Non-Metallic Casting Material-6years After its Introduction.** Proc. 5th International Congress on Polymers in Concrete, 1987.

<sup>3</sup> CHUA K. N., RAHMAN M. and MANSUR M. A.. **Performance Evaluation of Machine Tool Structures Using Modal Analysis Technique,** I. J. of Analytical and Experimental Modal Analysis, Vol. 2(1), 1987.

Tabela 2.4 – Propriedades de materiais aplicados em máquinas-ferramentas.

Material	Modulo de Young (E) (GPa)	Coefficiente de Poisson (ν)	Densidade (ρ) (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de expansão térmica (α <sub>0</sub> ) (E <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	Condutividade térmica (K) (W/mK)	Calor específico (Cp) (J/kg.K)	Resistencia à compressão (σ <sub>c</sub> ) (MPa)	Resistencia à tração (σ <sub>t</sub> ) (MPa)	Resistencia ao cisalhamento (σ <sub>0</sub> ) (MPa)
Aço AISI 1020	186	0,29	7 870	11,7 – 13,9	51,9	486 – 599	-	420	7 200
Aço AISI 1040	200	0,29	7 845	14 – 11,3	51,9 – 24,7	486 – 1 583	-	620	-
Aço inoxidável (visão geral)	77 – 310	0,22 – 0,346	190 – 9 010	7,02 – 21,1	10 – 34,3	200 – 850	262 – 3 000	34,5 – 3 100	228 – 597
INVAR 36	148	-	8 050	1,3 – 7,6	10,15	515	-	621	-
Ferro Fundido (visão geral)	62,1 – 240	0,24 – 0,37	5 540 – 7 810	7,75 – 19,3	11,3 – 53,3	506	-	90 – 1 650	-
Concreto de uso civil	20 – 40	-	1 900 – 2 800	10 – 14	0,16 – 1,28	-	40 – 100	-	-
Granito natural	20 – 60	0,1	2 540 – 2 660	3,7 – 11,0	1,2 – 4,2	210 – 350	96,5 – 310	7 – 25	9 – 38
Granito sintético	30 – 40	-	2 100 – 2 400	12 – 20	1,3 – 2,0	-	140 – 170	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor com base em MATWEB, 1996-2020 e Vrtnatoski e Dukovski, 2005.

### 2.3.1 Ferro Fundido

O ferro fundido é um material muito utilizado na área industrial. Trata-se de uma liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2,0 % em peso, em quantidade superior à retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita (CHIAVERINI, 2005).

Segundo Artes e Genger (2013) as propriedades típicas dos ferros fundidos são: módulo de elasticidade de 80 GPa a 130 GPa, módulo de Poisson 0,3, resistência à compressão de 700 MPa a 1 200 MPa, resistência à flexão de 300 MPa a 600 MPa, resistência à tração de 150 MPa a 400 MPa, coeficiente de amortecimento 1, coeficiente de dilatação térmica linear de  $11 \text{ E}^{-6} \text{ K}^{-1}$  e condutividade térmica de 58 W/m·K.

Os projetos de estruturas convencionais de máquinas-ferramentas empregam estruturas feitas de aço soldado, aço fundido e ferro fundido. De modo geral, as estruturas fundidas em moldes são preferidas para maiores volumes de produção, enquanto peças únicas ou pequenos lotes são obtidos por estruturas soldadas. Enquanto o ferro fundido oferece características benéficas ao amortecimento, o aço soldado permite economia de material e massa devido ao maior módulo de elasticidade. Para fundições, moldes caros e núcleos de fundição devem ser produzidos, o que pode ser evitado nas construções soldadas (MÖHRING et al., 2015).

O ferro fundido apresenta maior dificuldade para ser soldado (baixa soldabilidade) em comparação com o aço baixo carbono, principalmente os ferros fundidos cinzentos. Por conta do alto teor de carbono, o processo de soldagem gera mudanças metalúrgicas na zona afetada pelo calor (ZAC) que favorecem distorções e trincas microestruturais restringindo a aplicação de estruturas soldadas (DAMTEW, 2015).

Comumente se utiliza ferros fundidos cinzentos perlíticos do tipo A, que possuem dureza de aproximadamente 220 HB e resistência à tração próxima de 196 MPa. A escolha do material deve considerar também a sua usinabilidade Koenigsberger e Tlusty<sup>1</sup> (1970 *apud* STOETERAU, 2004).

---

<sup>1</sup> KOENIGSBERGER, F.; TLUSTY, J. **Machine Tool Structures**. Pergamon Press, 1970.

### 2.3.2 Aços

As ligas de aço ainda estão entre os materiais mais utilizados para confecção de componentes de máquinas-ferramentas, sejam elas de precisão ou não. Essas ligas são aplicadas desde parafusos até a estrutura do equipamento (CHIAVERINI, 2015; MOHRING *et al.*, 2015; STOETERAU, 1999; ARAUJO, 2009).

O aço adquiriu grande parte de sua aplicabilidade a partir do século XX, quando foi extensivamente estudado. Destaca-se como material de construção devido sua resistência mecânica, usinabilidade, disponibilidade e soldabilidade, facilitando o processo de fabricação e montagem de estruturas em comparação a outros materiais (CHIAVERINI, 2005). Entretanto, o processo de soldagem, devido ao ciclo térmico localizado com aquecimento e resfriamento rápido introduz zonas termicamente afetadas e tensões mecânicas residuais que podem comprometer o desempenho da máquina-ferramenta, principalmente quanto as distorções estruturais (MÖHRING *et al.*, 2015).

Para minimizar os danos térmicos de soldagem a estrutura deve passar por ciclo térmico de alívio de tensões. Dependendo do tamanho da máquina, a operação pode ser difícil ou tecnicamente inviável. Alguns fabricantes deixam os fundidos expostos ao tempo por meses ou anos aguardando o alívio de tensão natural da estrutura. Se necessário ainda passam por tratamento térmico de alívio de tensão (SILVA e MEI, 1988).

As propriedades mecânicas dos aços dependem principalmente de dois fatores, sendo eles, composição química e microestrutura. A composição química nos aços comuns apresenta o carbono como principal elemento de liga, além de manganês, silício, fósforo e enxofre como elementos que sempre estão presentes. A estrutura depende da composição química, tratamento mecânico e tratamento térmico (CHIAVERINI, 2005).

A partir de combinações tanto na composição química quanto na microestrutura é possível alcançar características como boa soldabilidade, temperabilidade, usinabilidade, conformabilidade, resistência ao desgaste, resistência à corrosão, resistência à oxidação e elasticidade, conferindo a eles boa aplicação como material estrutural de máquinas-ferramentas. O módulo de elasticidade é uma característica que se destaca há seleção do aço carbono e depende principalmente da estrutura do aço (ligação química), não sendo afetada significativamente pela composição química (SILVA e MEI, 1988; CHIAVERINI, 2005).

Máquinas e equipamentos voltados a engenharia de precisão devem ser minimamente afetados por efeito térmico. Assim, a aplicação de materiais com reduzida expansão térmica



como, por exemplo, a liga de aço Invar, ligas de Fe-Ni. Axinte (2010) empregou o Invar 36 na estrutura de máquina-ferramenta de precisão.

As principais propriedades do Invar 36 são: densidade de 8 050 Kg/m<sup>3</sup>, módulo de elasticidade de 148 GPa, resistência à tração de 621 MPa, condutividade térmica de 10,15 W/mK, calor específico de 515 J/kgK e coeficientes de dilatação térmica de 1,3 E<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup> (para T < 93 °C), 4,18 E<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup> (93 °C < T < 260 °C) e 7,60 E<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup> (T > 260 °C) (MATWEB, 2022).

A liga Inovco (63 % Fe, 32 % Ni e 5 % Co), também chamado de “Super Invar”, possui coeficiente de dilatação térmica linear de 0,72 E<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>, sendo ainda menor que o do Invar 36 (MÖHRING *et al.*, 2015).

Outra opção de material de construção são os aços inoxidáveis, caracterizados por apresentarem teor de Cromo acima de 12 %, o que lhes conferem maior resistência à corrosão, oxidação e inércia química e tenacidade, porém com menor condutividade térmica que os aços carbonos (SILVA e MEI, 1988). Essa última característica pode ser desafiadora no que tange dissipar a energia térmica do sistema. Dentre os aços inoxidáveis encontra-se desde categorias mais duras e frágeis como os martensíticos, até aqueles com maior ductilidade como os austeníticos (CARBÓ, 2008).

### 2.3.3 Granito natural

O granito natural é constituído de quartzo, mica e feldspato e varia sua composição de acordo com a sua origem. Quanto menor o tamanho de grão, melhor é o desempenho do granito (MÖHRING *et al.*, 2015).

Destaca-se na aplicação em sistemas de medição, equipamentos metrológicos e máquinas-ferramentas de UP (CIUPAN e POPA, 2018; MÖHRING *et al.*, 2015; HUO e CHENG 2008; STOETERAU 1999).

Segundo Möhring *et al.* (2015), o granito natural diferencia-se por ser antimagnético, isolante elétrico e térmico, duro e frágil, não gera rebarba, possui maior amortecimento de vibração comparado aos aços, maior estabilidade química e dimensional do que os aços tradicionais. Quantitativamente, algumas propriedades do granito natural estão listadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Propriedades do granito natural.

GRANITO NATURAL	Densidade ( $\rho$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (E) (GPa)	Resistência à compressão ( $\sigma_c$ ) (MPa)	Tensão de flexão ( $\sigma_f$ ) (MPa)	Coefficiente de dilatação térmica linear ( $\alpha_0$ ) (K <sup>-1</sup> )
Impala (África do Sul)	2 900	90	300	20	6,5
Black Galaxy (Índica)	2 900	44	190	19	6,0
Ji nan Black (China)	3 000	70	250	26	5,0
Tarn (França)	2 900	46	180	24	6,0
Cinza Mauá	-	-	147	17	16,7

Fonte: adaptado de Möhring *et al.*, 2015 e Instituto de Pesquisas Tecnológicas<sup>1</sup>, 2000; *apud* MOREIRAS, 2014.

As propriedades do granito natural justificam sua aplicação em estruturas e guias de máquinas-ferramentas e sistemas metrológicos de precisão, porém especial atenção deve ser dada em relação a aplicação em ambientes úmidos (HUO e CHENG, 2008).

A grande oferta de diferentes tipos garante variabilidade de propriedades dos granitos naturais. De acordo levantamento realizado em uma das principais bases de dados de propriedades de materiais, encontrou-se valores de densidade de 2 540 kg/m<sup>3</sup> a 2 600 kg/m<sup>3</sup>, resistência à tração de 7 MPa a 25 MPa, resistência à compressão de 96,5 MPa a 310 MPa, módulo de elasticidade de 20 GPa a 60 GPa e condutividade térmica de 1,2 W/mK a 4,2 W/mK (MATWEB, 2022).

<sup>1</sup> INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS – IPT. Catálogo de Rochas Ornamentais do Estado de São Paulo. IPT. São Paulo, 2000.

#### 2.3.4 Granito Sintético

O granito sintético é um material compósito obtido da mistura de material de enchimento (por exemplo, areia, granito, mármore, quartzo, perlite, vidro, fibras, dolomita, aços) com polímero (tipicamente os termofixos, poliéster insaturado, polimetilmetacrilato, epóxi). A reação de polimerização é exotérmica e demanda o uso de catalisador (ATEŞ e GERGER, 2013).

Mckeown (1980) desenvolveu o Granitan S-100 com o intuito de substituir ferros fundidos e aços em estruturas e componentes de máquinas-ferramentas. Esse material é fabricado com uma parte de resina/endurecedor para cada duas partes de granito de alta qualidade. Inicialmente, a resina epóxi é misturada ao granito natural previamente triturado e selecionado em diferentes granulometrias. A mistura é transferida para o molde sujeito a vibração para distribuição, compactação e desaeração (LINTZ, 2003).

Também denominado de concreto polimérico (*Polymer Concrete*), sua aplicação destaca-se em decorrência da rigidez estática próxima a do ferro fundido, maior amortecimento de vibrações relativo aos demais materiais típicos de estruturas de máquina-ferramenta, menor densidade relativa em relação aos aços e ferros fundidos, possibilidade de redução de frequências naturais das estruturas, menor dilatação térmica comparada ao ferro fundido e maior inércia química. As propriedades finais são fortemente dependentes do tipo e proporção da resina, a vista esta é responsável por unir química e mecanicamente a fase de preenchimento (MÖHRING *et al.*, 2015).

As principais propriedades de polímeros termofixos ou resinas aplicadas em granito sintético são apresentadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Propriedades típicas de resinas para fabricação de granito sintético.

Aglomerantes	Metacrilato	Epóxi	Furano	Poliéster-estireno	Ester de vinila
Consumo em peso (%)	6 a 12	20	-	8 a 18	7
Resistência a tração na flexão ( $\sigma_f$ ) (MPa)	8 a 62	17 a 34	21 a 24	8 a 59	17 a 149
Resistência a compressão ( $\sigma_c$ ) (MPa)	70 a 140	59 a 120	62 a 102	70 a 140	62 a 110
Resistência a tração ( $\sigma_t$ ) (MPa)	8 a 14	9 a 24	9,6 a 14	11 a 70	10 a 90
Resistência ao cisalhamento ( $\sigma_0$ ) (MPa)	26	-	-	2	-
Densidade ( $\rho$ ) (Kg/m <sup>3</sup> )	2 388	2 180 a 2 596	-	-	2 404
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,23 a 0,35	-	-	-	0,22
Retração (%)	1,5 a 5,0	0,02 a 0,20	0,1 a 0,2	0,3 a 3	-

Fonte: Lintz, 2003.

Outra opção comercial de concreto polimérico, denominado de Zanite, emprega quartzo. O quartzo possui 99,6 % de SiO<sub>2</sub>, apresentando, assim, maior dureza, maior resistência mecânica e química comparado a outros agregados convencionais (LINTZ, 2003).

No Brasil, Lovo *et al.* (2018) empregaram o granito Cinza Maúa no desenvolvimento de granito sintético associado a resina epóxi LY 5052, para a qual o fabricante menciona uma resistência à tração de 82 MPa. As propriedades do compósito são apresentadas na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Propriedades do granito sintético de acordo com a literatura.

Material	Densidade ( $\rho$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de expansão térmica ( $\alpha_0$ ) (K <sup>-1</sup> )	Condutividade térmica (K) (W/m·K)	Coefficiente de amortecimento ( $\zeta$ )	Resistencia à Compressão ( $\sigma_c$ )	Resistencia à Tração ( $\sigma_t$ )	Resistencia à Flexão ( $\sigma_f$ )
Epóxi L 5052 / Granito Cinza Mauá não reforçado com fibras de carbono (LOVO, <i>et al.</i> , 2018)	2 100	$1,4 \times 10^{-5}$	$1,2 \pm 0,1$	$0,018 \pm 0,002$	$103 \pm 5$	$27 \pm 3$	$42 \pm 2$
Epóxi L 5052 / Granito Cinza Mauá reforçado com fibras de carbono (LOVO, <i>et al.</i> , 2018)	-	-	-	-	-	-	$51 \pm 2$
Zenite (LINTZ, 2003)	2 300	$1,2 \times 10^{-5}$	1,6	-	137	19	29
20 % Resina YD-128 com (MIX 50x50) com granito de construção civil (PIRATTELLI-FILHO e SHIMABUKURO, 2008)	-	-	-	-	114	-	-
Granito fabricado por Ashby & Jones (PIRATTELLI-FILHO e SHIMABUKURO, 2008)	2 600	-	-	-	65 – 150	23	-
Propriedades gerais do granito sintético (CHEN, CHEN, <i>et al.</i> , 2016)	2 200 – 2 500	-	1,7 – 4,0	0,03	110 – 130	10 – 20	20 – 30

Fonte: Elaborada pelo próprio autor com base em Lovo *et al.*, 2018; Lintz, 2003; Piratelli-filho e Shimabukuro, 2008.

Segundo Dou<sup>1</sup> (1995, apud Mohring, 2015) os concretos poliméricos apresentam condutividade térmica de 1 W/m·K a 3 W/m·K, coeficiente de dilatação térmica linear de  $7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

Lokuge e Aravinthan (2013) a partir de uma formulação utilizando uma matriz epoxy, alcançaram a resistência à compressão do concreto polimérico de 90 MPa a 100 MPa e resistência à tração próxima a 15 MPa.

O limite de escoamento marca a transição entre a deformação elástica e plástica nos materiais, este ponto está localizado na região onde ocorre o afastamento da linearidade da curva tensão deformação em um ensaio de tração. Materiais compósitos com matriz constituída de material termofixo como a resina epóxi normalmente apresentam maior dificuldade de identificação do limite de escoamento em comparação as ligas metálicas. Além de que parte destes compósitos sofrem fratura assim que alcançam o limite de escoamento (CALLISTER e RETHWISH, 2012). Por serem termofixos altamente reticulados após a cura, compósitos com resinas epóxi geralmente apresentam comportamento frágil e com baixa resistência a propagação de trincas (GONÇALVES, CAMPOS *et al.*, 2014) (XU, SHI *et al.*, 2004).

Cuipan (2018) traz uma revisão de literatura de propriedades do granito sintético, por exemplo, densidade de 2 100 Kg/m<sup>3</sup> a 2 400 Kg/m<sup>3</sup>, resistência à tração de 7 MPa a 18,4 MPa, resistência à compressão de 106,6 MPa a 130 MPa, módulo de elasticidade de 30 GPa a 40 GPa e coeficiente de Poisson de 0,22.

Jackisch<sup>2</sup> (2002, apud Erbe, Król e Theska, 2008) relata em seu trabalho a importância da resina epóxi, na mistura para confecção do granito sintético, como uma camada intermediária que mantém o material de enchimento unido. Sua porcentagem volumétrica para aplicações em engenharia mecânica normalmente é inferior a 12 %.

Artes e Genger (2013) relatam módulo de elasticidade de 30 GPa a 40 GPa, coeficiente de Poisson 0,2, resistência à compressão de 100 MPa a 160 MPa, resistência à flexão de 25 MPa a 35 MPa, resistência à tração de 12 MPa a 18 MPa, coeficiente de amortecimento de 6 a 8, coeficiente de dilatação térmica linear de  $17 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  e condutividade térmica de 1,8 W/m·K.

Kepczak e Pawlowski (2013) apresentam resistência à compressão inferior a 100 MPa, resistência à tração inferior a 10 MPa, resistência à flexão de 25 MPa a 40 MPa, densidade de 2 100 Kg/m<sup>3</sup> a 2 400 Kg/m<sup>3</sup>, módulo de elasticidade de 15 GPa a 40 GPa, capacidade térmica

---

<sup>1</sup> Dou K. **Thermisch bedingtes Deformationsverhalten von Metall-Mineralguss-Verbundkonstruktionen in Werkzeugmaschinen**, Otto-von-GuerickeUniversität Magdeburg, Magdeburg. 1995.

<sup>2</sup> Jackisch U. **Mineralguss für den Maschinenbau**. Verlag Moderne Industrie; 2002.

de 0,9 J/kg·K a 1,1 J/kg·K, condutividade térmica de 1,3 W/m·K a 2 W/m·K e coeficiente de dilatação térmica linear de  $12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  a  $20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

O menor módulo elástico ou rigidez do granito sintético relativo aos aços e ferros fundidos pode ser suplantado aumentando a espessura da seção das peças projetadas (PIRATELLI-FILHO e SHIMABUKURO, 2008).

Dentre as resinas, a epóxi se destaca pelo desempenho mecânico, porém apresenta maior custo relativo. Esse composto é termoendurecido, líquido à temperatura ambiente e catalisado pela poliaminoamida (ATEŞ e GERGER, 2013).

De acordo com Stoeterau (2004) a proporção mássica de resina epóxi e  $\text{SiO}_2$  é de 10 % e 90 %, respectivamente, podendo variar de acordo com a aplicação, atingindo resistência à compressão próxima a 130 MPa.

Com relação a técnica de moldagem do granito sintético, moldes temporários e permanentes são empregados, dependendo do volume de produção, para formar o negativo da peça. Os moldes podem ser projetados em várias partes, unidas por elementos de fixação (RIBEIRO e PURQUERIO, 1999).

A mistura de granito e resina líquida deve possuir viscosidade adequada para preencher os detalhes do molde. Para melhorar o acabamento superficial, revestimentos poliméricos (*gel coating*) são aplicados nas superfícies do molde. Para facilitar a desmoldagem são empregados agentes desmoldantes (por exemplo, ceras, lubrificantes) (RABAHI, 2015).

Geometrias relativamente complexas podem ser moldadas. Materiais metálicos (por exemplo, ligas de aço e alumínio), de origem orgânica (por exemplo, Fibras de Média Densidade - *Medium Density Fiberboard* – MDF e compensados de madeira, laminados ou não) e polímeros (por exemplo, nylon<sup>®</sup>, PVC) são empregados nos moldes. O projeto da peça e do molde devem considerar as vantagens e desvantagens da técnica de moldagem (ERBE, KRÓL e THESKA, 2008).

Uma das vantagens da moldagem do granito sintético é que a cura acontece em temperaturas relativamente menores do que a fundição de aços e ferros fundidos, permitindo a aplicação de moldes de madeira e polímeros, consumindo menos energia (ERBE, KRÓL e THESKA, 2008). Alguns pesquisadores sugerem que o processo é mais sustentável e mais econômico que a fundição de metais (RIBEIRO e PURQUERIO, 1999; RABAHI, 2015; CIUPAN e CIUPAN, 2016; CIUPAN e POPA, 2018; LOVO *et al.*, 2018).

Outra vantagem reside na disposição prévia de pontos de fixação ou insertos na estrutura. Dada a dureza do granito sintético curado, sua usinabilidade reduzida associada as demais propriedades mecânicas, a usinagem de roscas não é uma solução técnica recomendada.

Dessa forma, os insertos previamente inseridos na estrutura tem a função de oferecer superfícies funcionais que possibilitam a montagem dos demais subsistemas na estrutura. São projetados para serem envolvidos pelo granito sintético, ancorando-se rigidamente. Conseqüentemente, o moldado pode estar pronto para a aplicação após a desmoldagem (ERBE, KRÓL e THESKA, 2008).

Beigang (2019) apresenta um equipamento ao qual após realizar a preparação do molde utilizando compensados de madeira e posicionar os insertos e guias lineares, foi colocada a mistura de granito sintético, sendo esta compactada manualmente com uma haste. De maneira similar a realizada por Beigang (2019) o equipamento de Hegner (2015) foi desenvolvido a partir de um molde de compensados de madeira com diversos insertos e guias lineares previamente inseridos.

Quando tolerâncias dimensionais e geométricas mais estreitas são necessárias, usinagem é aplicada como processo de acabamento. A usinagem pode ser no granito sintético ou no inserto. Dada a resistência mecânica do granito sintético, tipicamente a usinagem faz uso de ferramentas super abrasivas. O principal processo de acabamento é a retificação com rebolos super abrasivos (SHAMRAY, DANESHI e AZARHOUSHANG, 2016). Para insertos metálicos são empregadas operações de furação, alargamento, rosqueamento, fresamento e retificação (ERBE, KRÓL e THESKA, 2008).

Com relação ao tempo de cura, este vai depender principalmente da resina e do catalisador utilizados. Para componentes geometricamente complexos e de precisão recomenda-se 24 horas. O granito sintético tem cura estimada de 8 horas a 10 horas, com resistência mecânica máxima alcançada após 5 ou 6 dias, enquanto o Zenite demanda no mínimo 8 horas para cura (LINTZ, 2003).

Em compósito com particulado pequeno, com diâmetro próximo a 10  $\mu\text{m}$ , o volume de particulado e a ductilidade da matriz são os parâmetros que mais influenciam sua fratura frágil. O volume de particulado limita sua adesão na matriz. Nos casos onde o volume de particulado não ultrapassa o volume crítico para adesão, o valor do limite de escoamento à tração é aproximadamente 1,33 vezes o limite de escoamento da matriz de acordo com critério de Von Mises (JANCAR, DIANSELMO e DIBENEDETTO, 1992).



## 2.4 PANORAMA DA USINAGEM DE PRECISÃO E ULTRAPRECISÃO

As usinagens de precisão e ultraprecisão estão em crescente demanda, destacando-se as aplicações para fabricação de lentes e espelhos de pequeno e grande porte, cerâmicas avançadas, semicondutores para processamento de dados, micro e nanodispositivos eletromecânicos (MEMS e NEMS), componentes de leitura e gravação de dados digitais, selos mecânicos, moldes, instrumentos e sistemas metrológicos, microcomponentes de relógios e dispositivos eletrônicos. Dessa forma, seguindo-se nos setores da óptica e fotônica, eletrônica, miniaturização, medicina, automobilística e aeroespacial em metais e ligas metálicas, cerâmicas, vidros e polímeros (FIOCCHI, 2014).

A aplicação da usinagem UP remonta a fabricação de espelhos reflexivos para fusão a laser, lentes esféricas e asféricas e componentes militares. Em seguida o processo foi disseminado nos setores civil, por exemplo, automotivo, energia, instrumentos médicos, tecnologias optoeletrônicas e telecomunicação (YUAN *et al.*, 2017). O grande motivador do desenvolvimento da usinagem de UP é a óptica, tipicamente a manufatura de espelhos reflexivos de grande porte montados em telescópios e lentes reflexivas e transmissivas de microscópios e dispositivos para laser (BRINKSMEIER, 2010; YUAN *et al.*, 2017).

Os processos de usinagem relevantes são o torneamento, fresamento, retificação, lapidação e polimento. São largamente estudados e aplicados em empresas e centros de pesquisa. Os trabalhos dos pesquisadores Brinksmeier (2010), Huo, Cheng e Wardle (2010), Shore e Morantz (2012), Zareena e Veldhuis (2012), Zhang *et al.* (2015), Yuan *et al.* (2017), Zhang *et al.* (2019) e Li *et al.* (2021) são exemplos de trabalhos relevantes no cenário mundial que demonstram a crescente necessidade por mais estudos para suprir os gargalos tecnológicos atuais e expandir as fronteiras do conhecimento.

A seguir serão destacados alguns fabricantes de máquinas-ferramentas de UP, pesquisadores, laboratórios e centros de pesquisa com atuação relevante no cenário da manufatura de UP. Essa revisão de literatura não tem objetivo de esgotar o assunto, mas, sim, nortear a pesquisa desenvolvida neste trabalho.

A empresa Toyoda desenvolve máquinas-ferramentas desde 1941, destacando-se os modelos ANN10 e AHN60-3D de UP (TOYODA, 2022).

A UVA Lidköping iniciou sua operação em 1943, atualmente os modelos de tornos e retificadoras destacam-se nas séries DG, CL, SUU, SUUC, VTG, High Volume e UVA (UVA LIDKÖPING, 2022).

A Fives Group está no setor de retificadoras a mais de 120 anos, com portfólio atual de um torno de UP denominado Cranfield Precision EcoR1664 e as retificadoras Cranfield Precision OGM e TTG. OS modelos Giustina XL-VSD2500 e Giustina HDD1067 são indicados para fabricação de rolamentos de UP. Na indústria de semicondutores visando acabamento espelhado a Fives Group disponibiliza a Cranfield Precision *OGM1600* (FIVESGROUP, 2022).

A Kern Microtech atua desde 1962 com projeto e fabricação de máquinas próprias para atender a demanda de serviços de usinagem de precisão e UP de clientes. A qualidade dos serviços e das peças criaram a demanda por essas máquinas, que passaram então a ser comercializadas pela empresa, destacando-se os centros de usinagem Pyramid Nano e Micro HD além de equipamentos de precisão como a Micro Vario, Micro Pro e EVO (KERN, 2022).

A empresa LT Ultra atua desde 1995. Seu portfólio de tornos incluem os modelos MTC 250, MTC 350, MTC 400 e MTC 650 e a opção de microfresamento nos modelos MMC 600 e MMC 900. Nas séries H as máquinas são dotadas de mancais hidrostáticos e aerostáticos (LT ULTRA, 2022). Além dos produtos, atua na prestação de serviço de usinagem de UP.

Quanto ao estudo comparativo referente a geometria da estrutura de equipamentos de UP destaca-se o trabalho desenvolvido por Chen (2015) que avaliou quatro geometrias de máquinas de UP, sendo uma delas inédita.

No Brasil, não foi identificado fabricante de máquinas-ferramentas de UP. Os estudos na área são restritos a algumas universidades, destacando-se a Universidade de São Paulo (USP), Universidade Estadual Paulista – Júlio de Mesquita Filho (UNESP) e Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

O Laboratório de Mecânica de Precisão da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), Laboratório de Tecnologia da Usinagem (LATUS) da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB-UNESP) e o Laboratório de Mecânica de Precisão da UFSC são os laboratórios com maiores contribuições em UP. Em microusinagem as contribuições são do Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA-EESC-USP) e Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

As pesquisas brasileiras de destaque são:

Jasinevicius (1998) investigou a influência da transição de fase sobre os limites de ductilidade no torneamento de UP do silício monocristalino.

Stoeterau (1999) abordou a importância da seleção da estrutura da máquina-ferramenta de UP, analisando também a seleção e aplicação de materiais nas estruturas de

máquinas-ferramentas de UP para elaborar um protótipo de uma máquina-ferramenta de UP a partir de conceitos e materiais definidos pelas limitações de fabricação do cenário presente na época.

Lintz (2003) estudou a aplicação de materiais alternativos para a fabricação de estruturas de máquina-ferramenta.

Pereira (2004) apresentou metodologia de projeto para sistemas mecânicos de precisão, destacando a importância da seleção de metodologia de projeto no desenvolvimento de projeto de UP.

Zhu (2004) estudou um processo abrasivo combinado com algumas características da lapidação e retificação. Investigando assim a variação dos valores do grau de recobrimento ( $U_d$ ) na dressagem de relolo de SiC de 800 mesh de ligante epóxi e as influências sobre a rugosidade, taxa de remoção de material, emissão acústica e o desvio de planeza da peça usinada.

Colafemina, Jasinevicius e Duduch (2007) investigaram o torneamento de UP com ferramenta de diamante da liga de titânio Ti-6Al-4V e do titânio comercialmente puro.

Araujo (2009) projetou uma fatiadora de cerâmica (*dicing saw*) aplicando metodologia de projeto para desenvolver uma máquina de corte de precisão validada no corte de alumina.

Cruz (2009) propôs o projeto de um equipamento inédito que combinou os processos de retificação e lapidação voltado a usinagem de UP de superfícies planas.

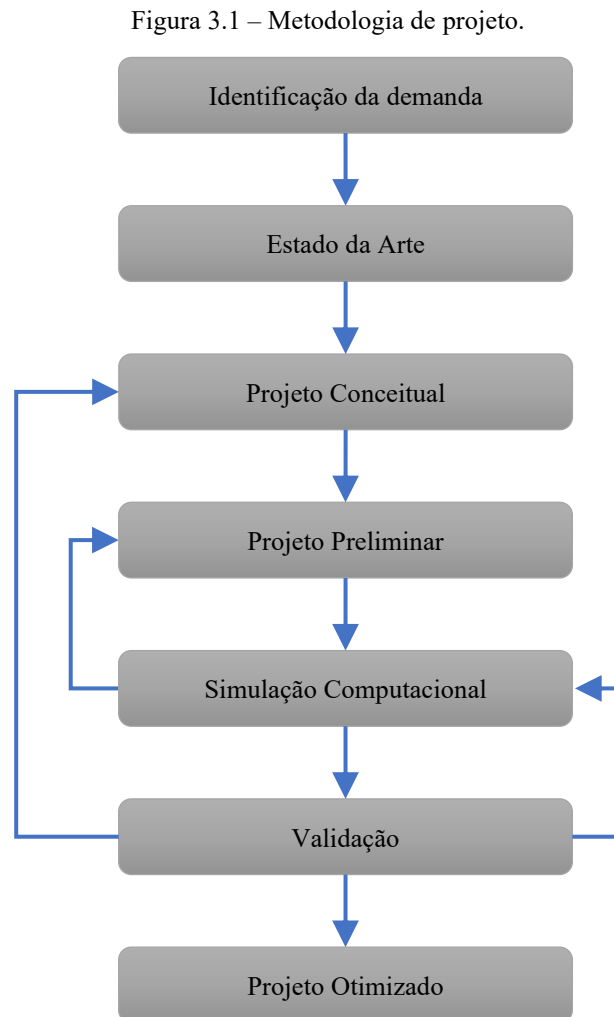
Fiocchi (2010) projetou e construiu o primeiro protótipo da Lapidoretificado CNC voltada à usinagem de UP de superfícies planas, processo batizado de lapidoretificação  $U_d$ , estudando a lapidoretificação  $U_d$  do aço inoxidável AISI 420 por meio da dressagem de rebolo de SiC de granulometria de 800 mesh com três graus de recobrimento ( $U_d = 1, 3$  e  $5$ ). A patente PI 0914279-7 A2 da máquina e processo de usinagem de UP foi depositada em 2009.

Sanchez, Jun e Fiocchi (2011) investigaram a lapidoretificação  $U_d$  para acabamento do aço de construção mecânica AISI 4340 em uma lapidadora adaptada.

Fiocchi (2014) desenvolveu o segundo protótipo da Lapidoretificadora CNC como um projeto adaptativo de Fiocchi (2010) visando a usinagem de UP de cerâmicas avançadas, avaliando a zircônia tetragonal policristalina estabilizada com ítria. A pesquisa destacou a importância da cinemática do processo, afiação da ferramenta de corte, projeto mecânico de engenharia voltado à máquina e processo, assim como os seus dispositivos visando a usinagem de UP.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia de projeto definida neste trabalho é apresentada no fluxograma da Figura 3.1 com base nos trabalhos de Blanchard e Fabrycky (1998) e Pahl e Beitz (1996).



O fluxo de trabalho iniciou com a identificação da demanda (detalhada no próximo capítulo) e levantamento bibliográfico do estado da arte relacionado a projeto mecânico de estrutura de máquina-ferramenta de precisão quanto a sua geometria e material. Na fase de projeto conceitual foram definidas as condições de contorno do projeto mecânico e seis diferentes geometrias estruturais aplicando o granito sintético como material de construção. O projeto preliminar considerou seis propostas geométricas básicas que foram avaliadas por simulação de elementos finitos visando validar o projeto. Essas etapas são detalhadas a seguir.

### 3.1 IDENTIFICAÇÃO DA DEMANDA

Diante do cenário de pesquisa, desenvolvimento e inovação (P&D&I) no segmento de máquinas-ferramentas, processos e serviços que empregam processos subtrativos de manufatura, foi identificado que há demanda mundial por equipamentos de precisão e ultraprecisão miniaturizados, multifuncionais ou multiprocessos, automatizados e integrados à indústria 4.0.

Desse modo, apesar de contar com importantes centros brasileiros atuando na área, as pesquisas e resultados com nível de maturidade tecnológica ABNT TRL 8 e TRL 9 ainda são incipientes no Brasil. Vislumbra-se que a evolução não somente tecnológica, mas também formação de mão de obra qualificada e massa crítica contribuirão significativamente para o desenvolvimento do país, com elevado potencial para exportação de produtos industrializados de elevado valor agregado, gerando riqueza e desenvolvimento econômico e social.

No Brasil não há desenvolvimento consolidado de minimáquinas-ferramentas fora da academia. Quando necessário, a indústria nacional tem dependência tecnologia de produtos e serviços estrangeiros. Dessa forma, a janela de oportunidade é explorada nesta pesquisa avaliando diferentes geometrias de estruturas de máquinas comumente encontradas em equipamentos de médio e grande porte, assim como propondo o estudo de novas geometrias visando a aplicação do granito sintético como material base para o projeto de minimáquina multifuncional.

### 3.2 PROJETO CONCEITUAL

O projeto conceitual foi subdividido nos capítulos 3.2.1 delimitação de projeto, 3.2.2 quadros morfológicos e 3.2.3 conceitos estruturais de seis estruturas para minimáquinas de UP.

### 3.2.1 Delimitação do projeto

As restrições ou condições de contorno impostas a este projeto foram:

- Sistema de coordenada cartesiana com quatro graus de liberdade, sendo três eixos lineares ortogonais de translação e um eixo de rotação da ferramenta perpendicular a dois dos eixos lineares;
- Envelope útil de trabalho de dimensões 400 mm x 400 mm x 400 mm;
- Deformação elástica estrutural  $< 0,1 \mu\text{m}$ ;
- Força estática máxima de 100 N, resultando em rigidez estática máxima de laço estrutural de  $100 \text{ N} / 0,1 \mu\text{m} = 1\,000 \text{ N}/\mu\text{m}$ ;
- Otimização geométrica para redução mássica estrutural, objetivando minimizar o volume de material;
- Granito sintético ( $\rho = 2\,100 \text{ Kg/m}^3$ ,  $E = 40 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0,2$ ,  $\sigma_c = 10 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_t = 100 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_0 = 40 \text{ MPa}$  e  $\zeta = 7$ ).
- Projeto geométrico das estruturas considerando a moldagem do granito sintético: facilidade de fabricação do molde, montagem do molde, desmoldagem, complexidade geométrica, tolerâncias dimensionais e geométricas e processos de acabamento;
- Estrutura versátil para aplicação de mancais e guias desde guias lineares de elementos recirculantes até sistemas aerostáticos e hidrostáticos;
- Sistemas de potência considerados para acionamento dos eixos: fusos e porcas de elementos recirculantes, servomotores e motores lineares eletromagnéticos;
- Força de usinagem atuando na superfície de um cabeçote ideal ou *spindle* (SP) rígido e indeformável engastado na estrutura. Dimensões do SP de 150 mm de diâmetro e comprimento de 400 mm projetado da estrutura, situação que representa a extensão máxima de pelo menos um dos eixos, promovendo assim os maiores momentos fletor e torsor na estrutura;
- Deformações estruturais por ação gravitacional ( $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ ), força de usinagem e a atuação simultânea da gravidade e força de usinagem; e
- Estrutura engastada na mesa ou estrutura base.

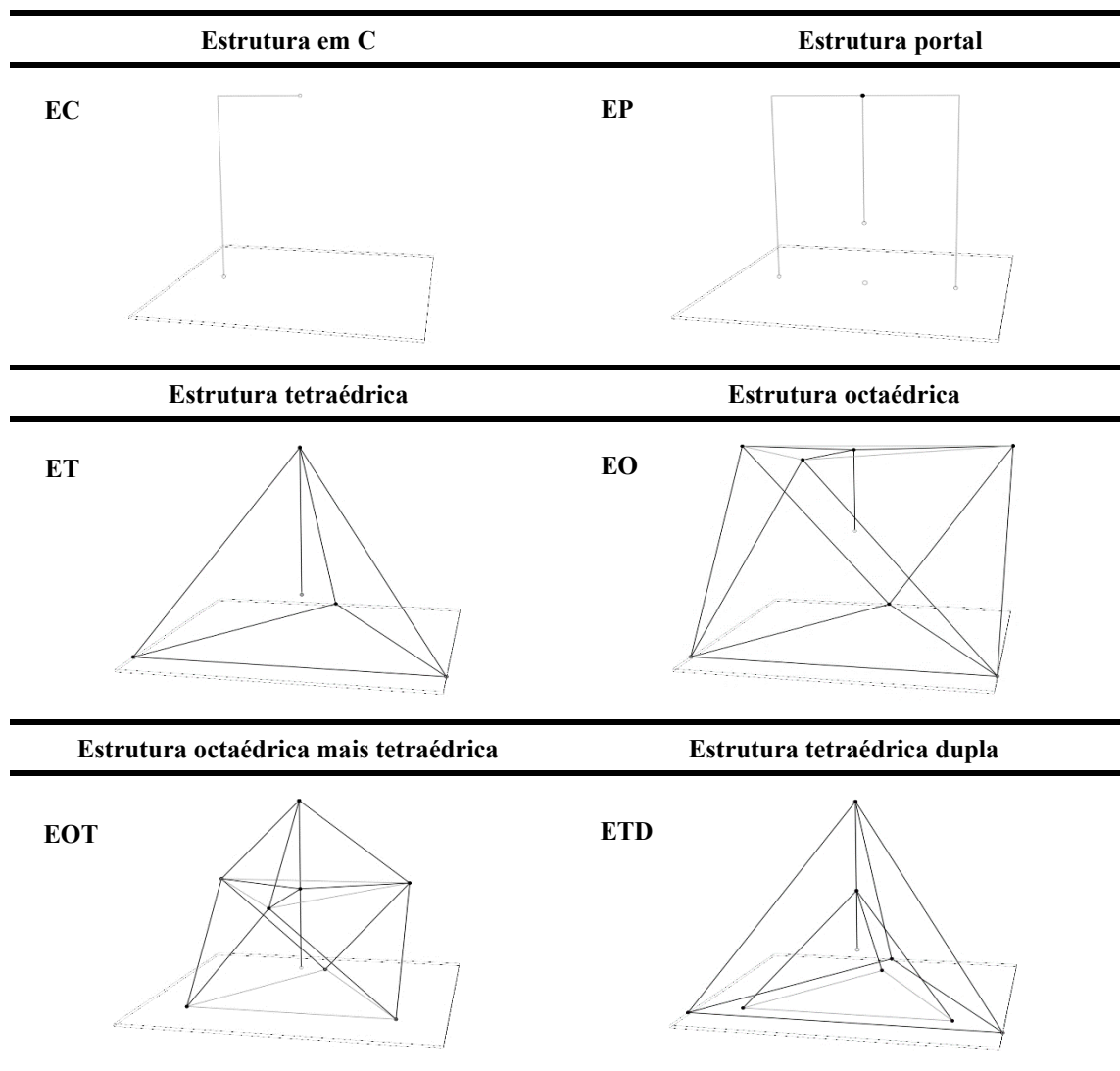
Por não possuir a curva tensão deformação do material adotado e nem valores referentes ao limite de escoamento deste material, supôs-se que o valor do limite de escoamento

fosse próximo ao da resistência a tração, sendo esta uma aproximação levando em conta um material de resina termofixo com comportamento frágil.

A rigidez de laço estrutural adotada de 1 000 N/ $\mu$ m foi selecionada de modo a estar próxima à da literatura de Chen (2016) e PARK *et al.* (2009). Sendo obtida a partir da força de usinagem isolada e dos parâmetros de projeto e conceitos adotados, por meio de iterações computacionais, tem como intuito modificar as dimensões de cada uma das geometrias visando alcançar estruturas com a rigidez de laço estrutural adotada.

Considerar-se-ão as geometrias estruturais denominadas EC, EP, ET, EO, EOT e ETD (nomenclatura definida na Figura 2.1), as quais estão conceitualmente representadas na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Conceitos geométricos das seis estruturas.



Os materiais de construção aplicados à simulação são definidos na Tabela 3.1, sendo o material ideal selecionado visando ser rígido e indeformável, no entanto, este foi limitado pelo software. O granito sintético foi definido a partir do limite inferior das propriedades presentes nas literaturas Kepczak e Pawlowski (2013) e Lovo *et al.* (2018), isso se dá por ainda não possuir os dados das propriedades mecânicas apresentadas pelo granito sintético que irá ser utilizado futuramente, logo, optou-se pelo material menos resistente para a realização do projeto preliminar visando a situação crítica de aplicação.

Tabela 3.1 – Propriedades dos materiais utilizados no projeto. Estrutura de granito sintético e cabeçote ou *spindle* de propriedades mecânicas ideais (rígido e indeformável).

	Granito Sintético	Material ideal do SP
Densidade ( $\rho$ ) [Kg/m <sup>3</sup> ]	2 300	1
Módulo de elasticidade (E) [GPa]	40	1 300
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,2	0,01
Limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) [MPa]	10	100 000
Resistência à Compressão ( $\sigma_c$ ) [MPa]	100	10 000
Resistência ao Cisalhamento ( $\sigma_0$ ) [MPa]	40	500 000
Coefficiente de Amortecimento ( $\zeta$ )	7	0

A força de usinagem foi aplicada em cinco condições de atuação na estrutura, considerando-se diferentes direções e sentidos entendidos com críticos para o projeto estrutural. Direções e sentidos adotados estão apresentados na Tabela 3.2, tendo como resultante de força a magnitude de 100 N.

Tabela 3.2 – Condições adotadas de aplicação de força de usinagem.

	Eixo X (N)	Eixo Y (N)	Eixo Z (N)
Caso 1	0	0	100
Caso 2	-57,73	-57,73	-57,73
Caso 3	57,73	57,73	57,73
Caso 4	100	0	0
Caso 5	0	100	0

O ponto com a maior deformação dentro da área de contato entre o SP a estrutura foi definida como ponto crítico da estrutura (PCE).



A análise referente à massa das estruturas apresentadas é de grande importância, pois atinge diretamente o tamanho e custo do equipamento, de modo que quanto maior a massa, maior será o gasto com matéria prima e moldagem da estrutura.

Sobre a tensão máxima atuante na estrutura, segundo o critério de Von Mises, considerou-se um coeficiente de segurança aplicado sobre o limite de escoamento do granito sintético. Segundo Erbe, Król e Theska (2008), envolvendo esforços dinâmicos deve-se considerar um fator de segurança igual a quatro. Ou seja, a tensão máxima deve ser quatro vezes menor que o limite de escoamento do material. Em se tratando de projeto preliminar em que não foi desenvolvido o detalhamento e otimização geométrica foi adotado coeficiente de segurança igual a três, condição essa menos conservadora e que será melhor investigada em trabalhos futuros.

Análise modal também foi realizada computacionalmente visando determinar as frequências naturais das estruturas do primeiro ao oitavo modo de vibração, servindo como um guia de operação em vez de um limite de operação dada o amplo espectro de frequências dos processos de usinagem de UP que variam de dezenas de Hz até dezenas de kHz.

### 3.2.2 Quadro Morfológico

O estudo morfológico foi baseado em um quadro específico para cada estrutura da minimáquina-ferramenta de UP. Os quadros morfológicos são apresentados nas Tabela 3.3 até a Tabela 3.8, respectivamente para a EC, EP, ET, EO, EOT e ETD.

Os quadros são compostos pelos parâmetros de projeto nas colunas da esquerda e suas possíveis soluções nas linhas. As linhas tracejadas e os pontos indicam as decisões de projeto.

Na Tabela 3.3 é apresentada a análise morfológica da minimáquina-ferramenta de EC. Com relação à movimentação dos eixos, a peça se movimenta no eixo X e a ferramenta se movimenta nos eixos Y e Z.

Tabela 3.3 – Análise morfológica da Minimáquina-ferramenta de ultraprecisão estrutura em C (EC).

<b>Sistema de coordenadas</b>	Cartesiana	Cilíndrica	Polar	Delta	SCARRA
<b>Graus de liberdade</b>	3 Translação 1 Ferramenta Rotativa	3 Translação 1 Eixo de Rotação 1 Ferramenta Rotativa	3 Translação 2 Eixos de Rotação 1 Ferramenta Rotativa		
<b>Material da Estrutura</b>	Ferro fundido	Aço inoxidável INVAR	Concreto	Granito natural	Granito sintético
<b>Movimentação do eixo X</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Movimentação do eixo Y</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Movimentação do eixo Z</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Local de aplicação da força relativa a usinagem</b>	Estrutura para simular guias e cabeçote de usinagem	Estrutura para simular cabeçote de usinagem	Local de acoplamento de guias de usinagem sem adicionar tais componentes		
<b>Material para estrutura que simula guias e cabeçote de usinagem</b>	Ferro fundido	Aço inoxidável INVAR	Material ideal	Granito natural	Granito sintético

Na Tabela 3.4 é apresentada a análise morfológica referente à EP. A ferramenta se move nos eixos Y e Z e a peça no eixo X.

Tabela 3.4 – Análise morfológica da Minimáquina-ferramenta de ultraprecisão estrutura pórtico (EP).

<b>Sistema de coordenadas</b>	Cartesiana	Cilíndrica	Polar	Delta	SCARRA
<b>Graus de liberdade</b>	3 Translação 1 Ferramenta Rotativa	3 Translação 1 Eixo de Rotação 1 Ferramenta Rotativa	3 Translação 2 Eixos de Rotação 1 Ferramenta Rotativa		
<b>Material da Estrutura</b>	Ferro fundido	Aço inoxidável INVAR	Concreto	Granito natural	Granito sintético
<b>Movimentação do eixo X</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Movimentação do eixo Y</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Movimentação do eixo Z</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Local de aplicação da força relativa a usinagem</b>	Estrutura para simular guias e cabeçote de usinagem	Estrutura para simular cabeçote de usinagem	Local de acoplamento de guias de usinagem sem adicionar tais componentes		
<b>Material para estrutura que simula guias e cabeçote de usinagem</b>	Ferro fundido	Aço inoxidável INVAR	Material ideal	Granito natural	Granito sintético

Para a ET a análise morfológica é apresentada na Tabela 3.5. A ferramenta se move nos eixos Y e Z e a peça no eixo X.

Tabela 3.5 – Análise morfológica da Minimáquina-ferramenta de ultraprecisão estrutura tetraédrica (ET).

<b>Sistema de coordenadas</b>	Cartesiana	Cilíndrica	Polar	Delta	SCARRA
<b>Graus de liberdade</b>	3 Translação 1 Ferramenta Rotativa	3 Translação 1 Eixo de Rotação 1 Ferramenta Rotativa	3 Translação 2 Eixos de Rotação 1 Ferramenta Rotativa		
<b>Material da Estrutura</b>	Ferro fundido	Aço inoxidável INVAR	Concreto	Granito natural	Granito sintético
<b>Movimentação do eixo X</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Movimentação do eixo Y</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Movimentação do eixo Z</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Local de aplicação da força relativa a usinagem</b>	Estrutura para simular guias e cabeçote de usinagem	Estrutura para simular cabeçote de usinagem	Local de acoplamento de guias de usinagem sem adicionar tais componentes		
<b>Material para estrutura que simula guias e cabeçote de usinagem</b>	Ferro fundido	Aço inoxidável INVAR	Material ideal	Granito natural	Granito sintético

A análise morfológica da EO é mostrada na Tabela 3.6. A ferramenta translada nos eixos Y e Z e a peça no eixo X.

Tabela 3.6 – Análise morfológica da Minimáquina-ferramenta de ultraprecisão estrutura octaédrica (EO).

<b>Sistema de coordenadas</b>	Cartesiana	Cilíndrica	Polar	Delta	SCARRA
<b>Graus de liberdade</b>	3 Translação 1 Ferramenta Rotativa	3 Translação 1 Eixo de Rotação 1 Ferramenta Rotativa	3 Translação 2 Eixos de Rotação 1 Ferramenta Rotativa		
<b>Material da Estrutura</b>	Ferro fundido	Aço inoxidável INVAR	Concreto	Granito natural	Granito sintético
<b>Movimentação do eixo X</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Movimentação do eixo Y</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Movimentação do eixo Z</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Local de aplicação da força relativa a usinagem</b>	Estrutura para simular guias e cabeçote de usinagem	Estrutura para simular cabeçote de usinagem	Local de acoplamento de guias de usinagem sem adicionar tais componentes		
<b>Material para estrutura que simula guias e cabeçote de usinagem</b>	Ferro fundido	Aço inoxidável INVAR	Material ideal	Granito natural	Granito sintético

Na Tabela 3.7 é apresentada a análise morfológica da EOT. A ferramenta translada nos eixos Y e Z e a peça no eixo X.

Tabela 3.7 – Análise morfológica da Minimáquina-ferramenta de ultraprecisão estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).

<b>Sistema de coordenadas</b>	Cartesiana	Cilíndrica	Polar	Delta	SCARRA
<b>Graus de liberdade</b>	3 Translação 1 Ferramenta Rotativa	3 Translação 1 Eixo de Rotação 1 Ferramenta Rotativa	3 Translação 2 Eixos de Rotação 1 Ferramenta Rotativa		
<b>Material da Estrutura</b>	Ferro fundido	Aço inoxidável INVAR	Concreto	Granito natural	Granito sintético
<b>Movimentação do eixo X</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Movimentação do eixo Y</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Movimentação do eixo Z</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Local de aplicação da força relativa a usinagem</b>	Estrutura para simular guias e cabeçote de usinagem	Estrutura para simular cabeçote de usinagem	Local de acoplamento de guias de usinagem sem adicionar tais componentes		
<b>Material para estrutura que simula guias e cabeçote de usinagem</b>	Ferro fundido	Aço inoxidável INVAR	Material ideal	Granito natural	Granito sintético

A última análise morfológica, apresentada na Tabela 3.8, é referente à ETD, com ferramenta transladando nos eixos Y e Z e peça no eixo X.

Tabela 3.8 – Análise morfológica da Minimáquina-ferramenta de ultraprecisão estrutura tetraédrica dupla (ETD).

<b>Sistema de coordenadas</b>	Cartesiana	Cilíndrica	Polar	Delta	SCARRA
<b>Graus de liberdade</b>	3 Translação 1 Ferramenta Rotativa	3 Translação 1 Eixo de Rotação 1 Ferramenta Rotativa	3 Translação 2 Eixos de Rotação 1 Ferramenta Rotativa		
<b>Material da Estrutura</b>	Ferro fundido	Aço inoxidável INVAR	Concreto	Granito natural	Granito sintético
<b>Movimentação do eixo X</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Movimentação do eixo Y</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Movimentação do eixo Z</b>	Peça	Ferramenta			
<b>Local de aplicação da força relativa a usinagem</b>	Estrutura para simular guias e cabeçote de usinagem	Estrutura para simular cabeçote de usinagem	Local de acoplamento de guias de usinagem sem adicionar tais componentes		
<b>Material para estrutura que simula guias e cabeçote de usinagem</b>	Ferro fundido	Aço inoxidável INVAR	Material ideal	Granito natural	Granito sintético

### 3.2.3 Conceitos estruturais

As premissas conceituais das seis estruturas consideraram o SP cilíndrico de propriedades ideais monolítico transpassando toda a estrutura que o envolve, dessa forma engastado na estrutura, nele atuando a força de usinagem e o movimento da ferramenta de corte.

Os conceitos são graficamente esquematizados nas Figuras 3.3 a 3.8, respectivamente para EC, EP, ET, EO, ETD e EOT.

Figura 3.3 – Conceito estrutura em C (EC).

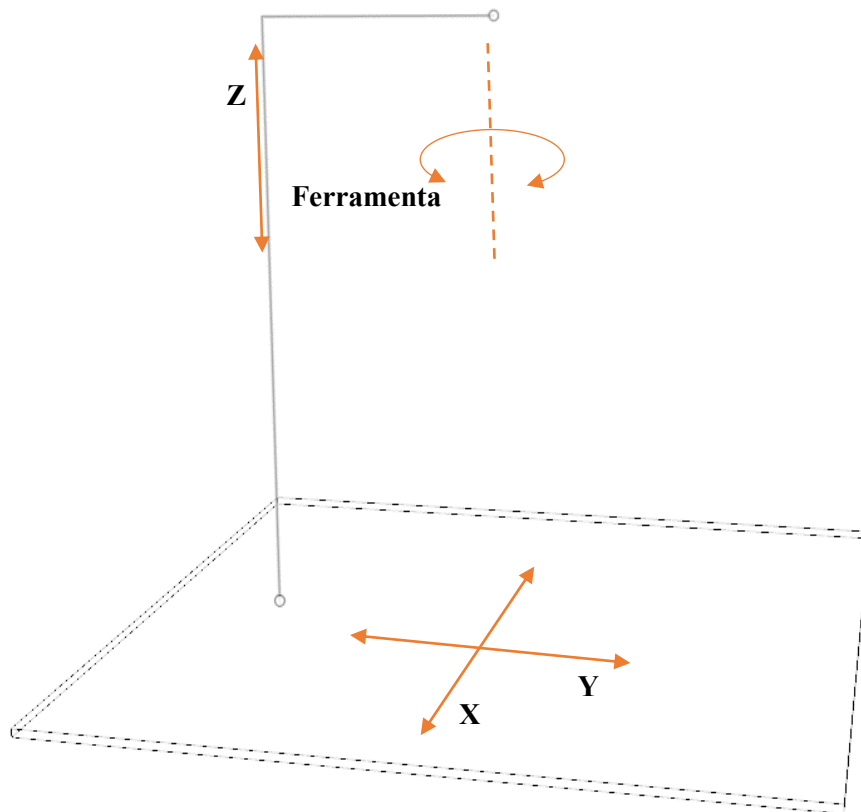


Figura 3.4 – Conceito estrutura em pórtico (EP).

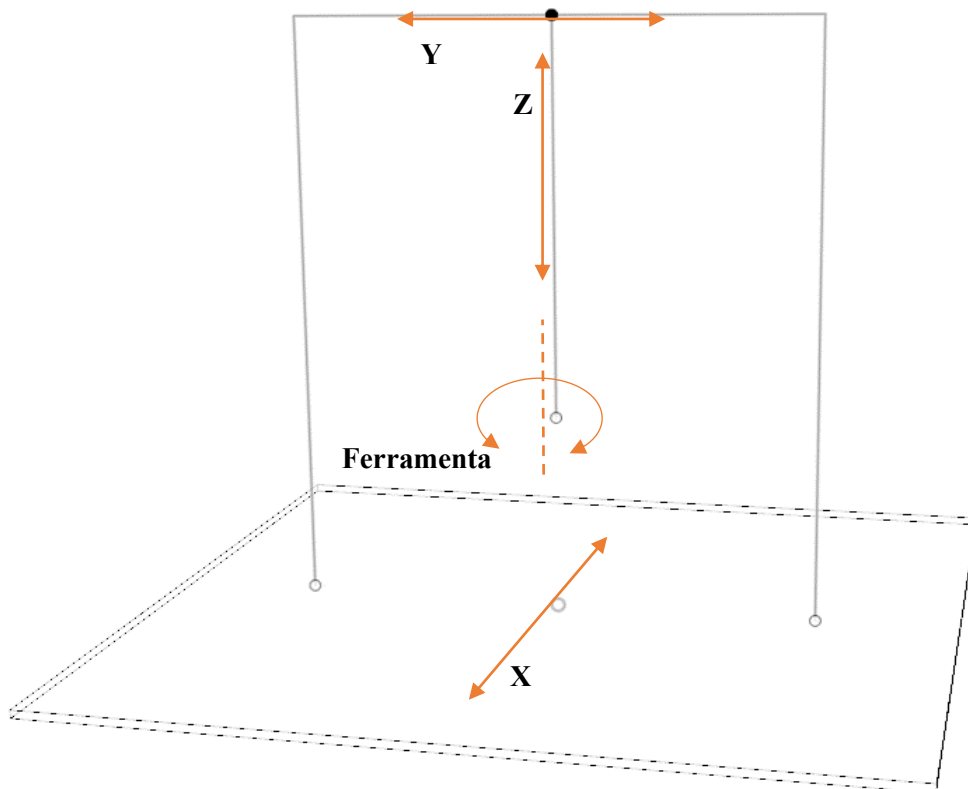




Figura 3.5 – Conceito estrutura tetraédrica (ET).

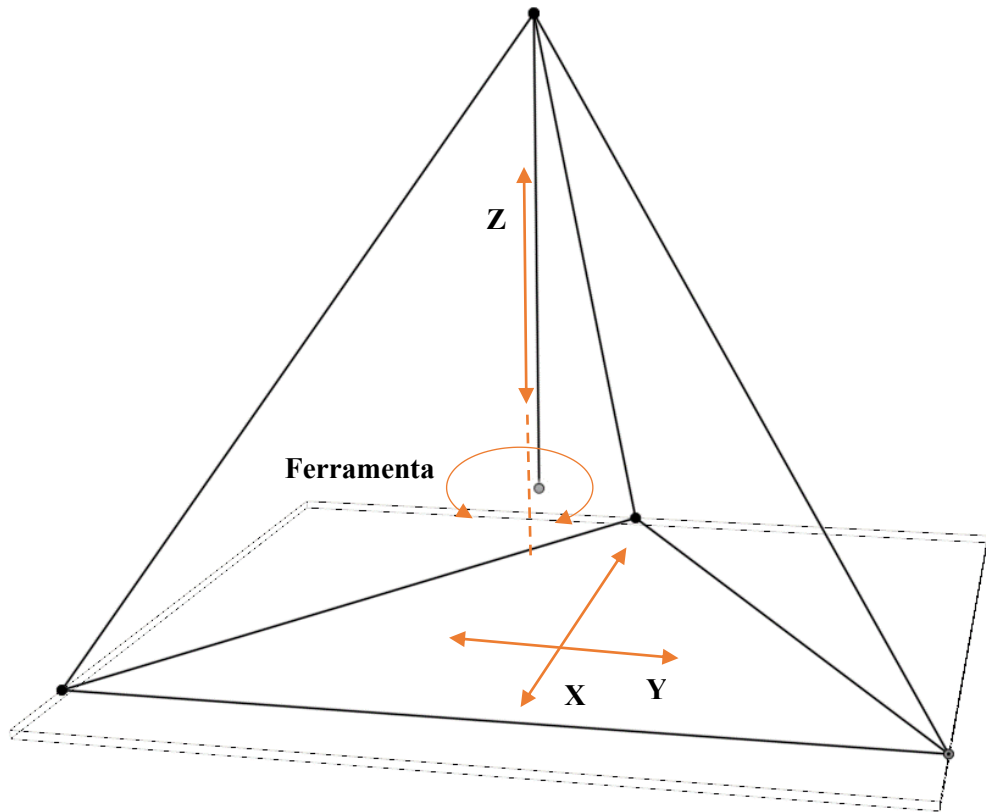


Figura 3.6 – Conceito estrutura octaédrica (EO).

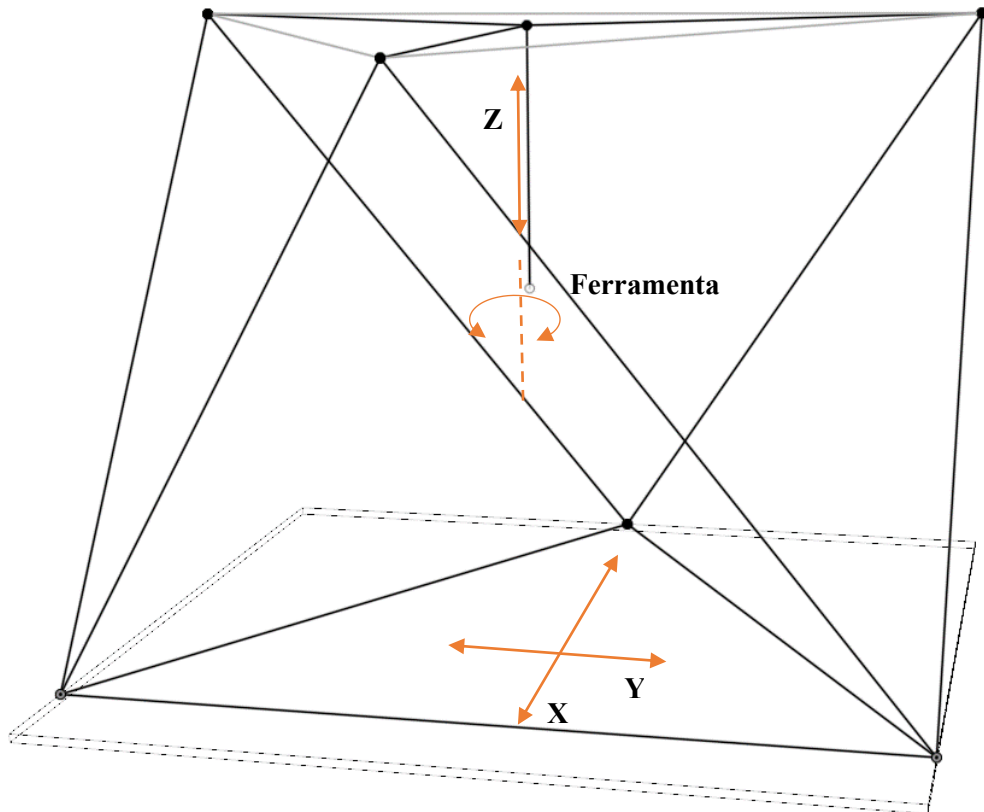


Figura 3.7 – Conceito estrutura tetraédrica dupla (ETD).

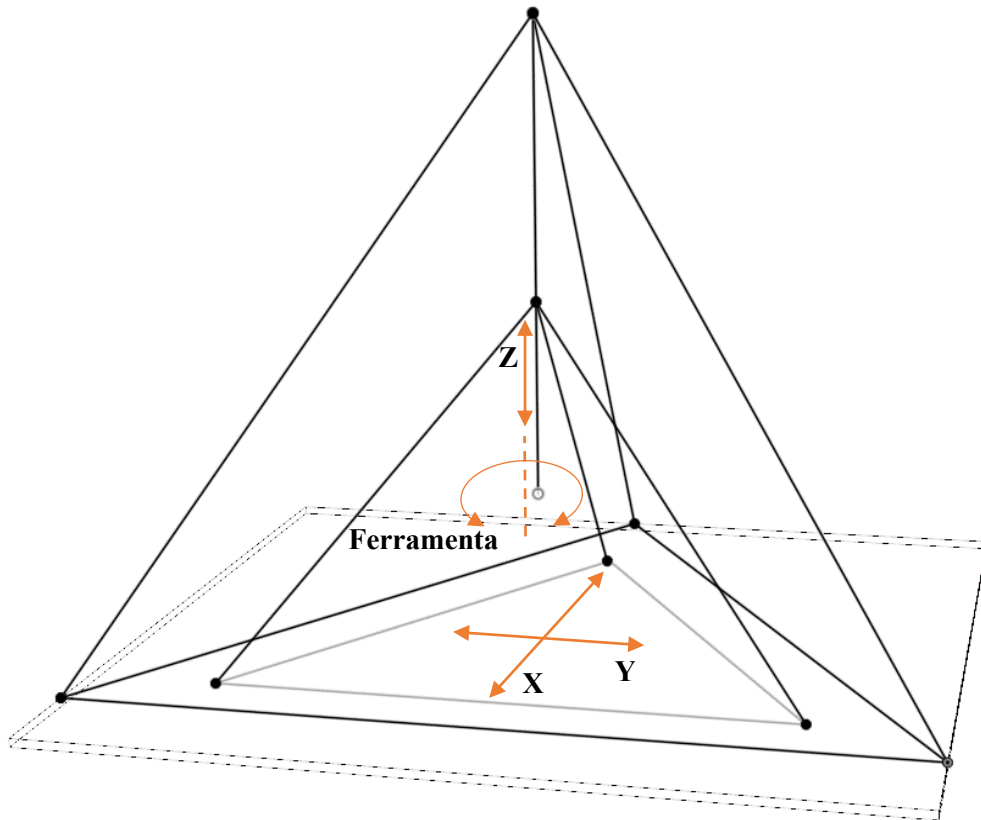
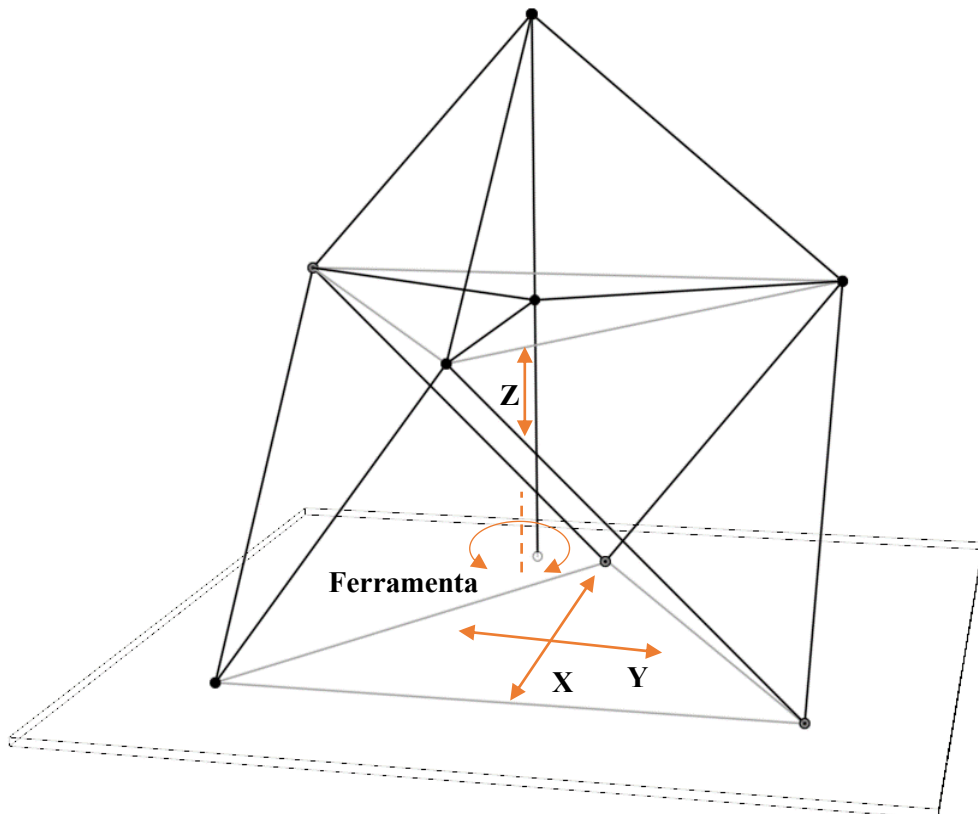


Figura 3.8 – Conceito estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).



### 3.3 PROJETO PRELIMINAR

O projeto preliminar empregou a análise de elementos finitos via simulação computacional no programa Fusion 360<sup>®</sup> da Autodesk.

#### 3.3.1 Materiais

Quanto ao granito sintético, a resistência a tração, a resistência à compressão, condutividade térmica, calor específico, coeficiente de expansão, resistência ao cisalhamento, densidade e módulo de elasticidade foram adotados de Kepczak e Pawlowski (2013) o coeficiente de Poisson e o coeficiente de amortecimento foram adotados de Lovo *et al.* (2018). Na Figura 3.9 é apresentada a janela de entrada de valores das propriedades do granito sintético no Autodesk Fusion 360<sup>®</sup>.

Figura 3.9 – Tabela de propriedades do granito sintético utilizadas na simulação computacional no Autodesk Fusion 360<sup>®</sup>.

<b>▼ Propriedades Térmicas</b>	
Condutividade térmica	1,750 W/(m·K)
Calor específico	0,100 J/(g·°C)
Coeficiente de expansão	16,000 µm/(m·°C)
<b>▼ Propriedades Mecânicas</b>	
Módulo de elasticidade	40,000 GPa
Coeficiente de Poisson	0,20
Resistência ao cisalhamento	40,000 MPa
Densidade	2,300 g/cm <sup>3</sup>
Coeficiente de amortecimento	0,02
<b>▼ Tensões</b>	
Resistência à tração	10,000 MPa
Limite de escoamento	10,000 MPa

Tradução nossa.

As propriedades do SP são declaradas na Figura 3.10. Essas propriedades, consideradas ideais no contexto deste projeto, foram limitadas pela biblioteca de parâmetros do Autodesk Fusion 360®.

Figura 3.10 – Tabela de propriedades do material ideal do cabeçote ou *spindle* (SP) utilizadas na simulação computacional no Autodesk Fusion 360®.

<b>▼ Propriedades Térmicas</b>	
Condutividade térmica	5,000E+03 W/(m·K)
Calor específico	0,385 J/(g·°C)
Coefficiente de expansão	16,000 µm/(m·°C)
<b>▼ Propriedades Mecânicas</b>	
Módulo de elasticidade	1300,000 GPa
Coefficiente de Poisson	0,01
Resistência ao cisalhamento	500000,000 MPa
Densidade	0,001 g/cm <sup>3</sup>
Coefficiente de amortecimento	0,00
<b>▼ Tensões</b>	
Resistência à tração	10000,000 MPa
Limite de escoamento	10000,000 MPa

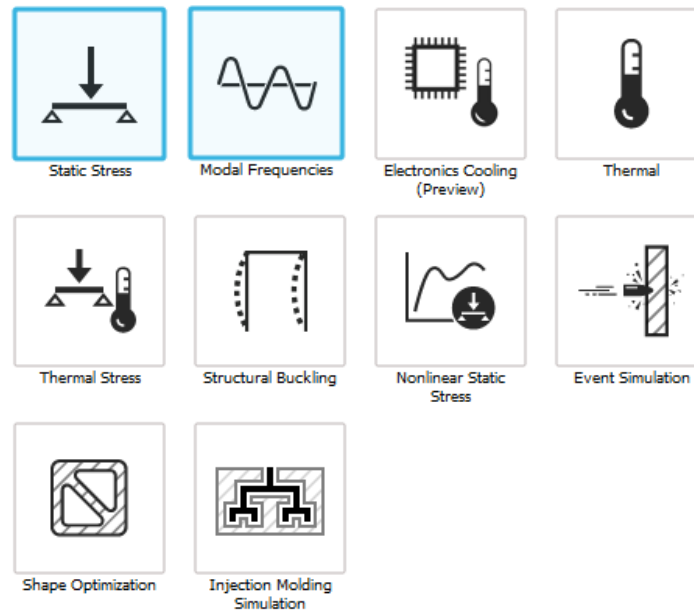
Tradução nossa.

### 3.3.2 Simulação Computacional

O programa Autodesk Fusion 360® foi escolhido por ser uma interface de desenvolvimento de produtos integrada à nuvem, possibilitando a elaboração de diversos projetos em 3D por equipes de forma remota. As opções de simulações disponíveis são mostradas na Figura 3.11, destacando os módulos de simulações estáticas de tensão e deformação e a análise modal utilizadas nesta pesquisa.

A Autodesk disponibilizou o acesso educacional gratuito para realização da pesquisa, possibilitando a solução de simulações computacionais complexas realizadas em nuvem.

Figura 3.11 – Opções de simulações do Autodesk Fusion 360®.



O Autodesk Fusion 360® permite a aplicação da malha na geometria tetraédrica, a qual é mais eficiente em os casos de estruturas complexas, com maior número de ressaltos e curvaturas. Além de possuir a opção de uma malha adaptativa que eleva o refinamento da malha em regiões consideradas críticas.

O manual da Autodesk enfatiza que a taxa de proporção “*Aspect ratio*” superior a 10 deve ser evitada em regiões críticas da malha, no entanto, são aceitáveis proporções maiores em casos de geometrias mais complexas e em regiões que não foram consideradas críticas.

Outro ponto a ser observado na malha é o “*Jacobian ratio*”, este apresenta a diferença entre a área do elemento gerado e a área de um elemento tetraédrico perfeito, com todos os lados iguais, sendo que melhores resultados possuem valores próximos a 1.

As condições de malha das simulações para as estruturas EC, ET, EP, EO, EOT e ETD de acordo com o software estão apresentadas na tabela.

Tabela 3.9 – Número de nós, elementos, taxa de proporção e Jacobiana das malhas.

	EC	EP	ET	EO	EOT	ETD
<b>Número de nós</b>	107 401	52 606	69 914	238 270	309 770	112 205
<b>Número de elementos</b>	74 039	35 138	47 202	163 333	141 462	73 578
<b>Pior taxa de proporção</b>	3,1	2,94	8,58	9,68	126	168
<b>Pior proporção Jacobiana</b>	1,21	1,28	2,12	1,96	2,02	2,08

As simulações para determinação das tensões e deformações estáticas na estrutura foram dividida em três condições quanto as forças atuantes na estrutura, quais sejam a (1) força de usinagem, (2) força da gravidade e (3) ação simultânea dessas forças externas.

Em seguida é realizada a simulação dinâmica para obter os modos de vibração.

O critério de Von Mises foi adotado para cálculo das tensões considerando a teoria da energia de cisalhamento objetivando dimensionar a estrutura para tensões abaixo da tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ) do granito sintético.

### 3.3.3 Estrutura

Geometrias básicas das seis estruturas foram consideradas e são apresentadas nas Figuras 3.12 a 3.23. Nessa fase do projeto não foram aplicados detalhes estruturais pertinentes às etapas seguintes da metodologia de projeto.

A EC, apresentada na Figura 3.12, é composta por uma coluna de dimensões 480 mm x 480 mm x 715 mm. O SP com comprimento de 880 mm transpassa a coluna e o centro da sua circunferência está localizado a 240 mm do topo e das arestas laterais da estrutura. A base da coluna foi engastada nos três eixos conforme a Figura 3.13 .

Figura 3.12 – Projeto da estrutura em C (EC).

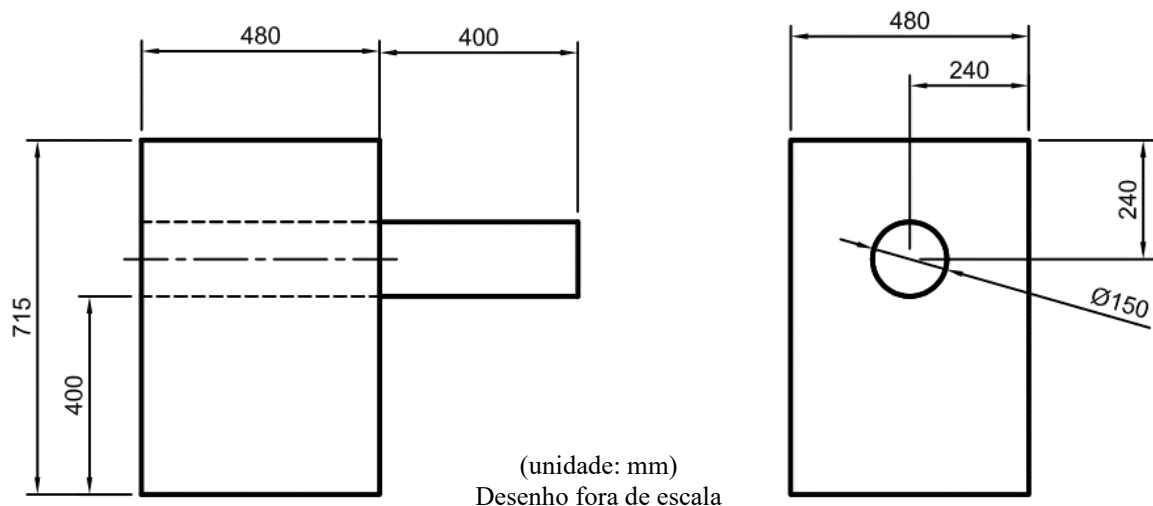
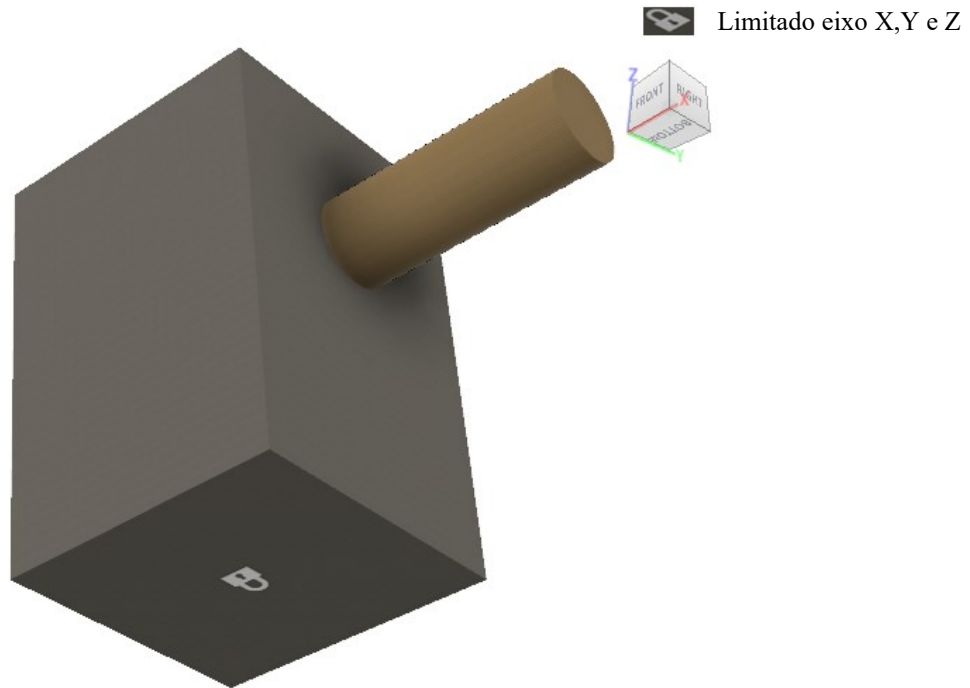


Figura 3.13 – Engastamento na EC.



O desenho técnico simplificado da EP simétrica, apresentado na Figura 3.14, é composto por duas colunas verticais iguais com as dimensões 300 mm x 350 mm x 670 mm, uma coluna horizontal, unindo as colunas verticais, com a dimensão de 270 mm x 350 mm x 550 mm. No centro da viga horizontal encontra-se o SP com comprimento de 670 mm e engastado. As bases das duas colunas foram engastadas nos três eixos conforme Figura 3.15.

Figura 3.14 – Projeto da estrutura pórtico (EP).

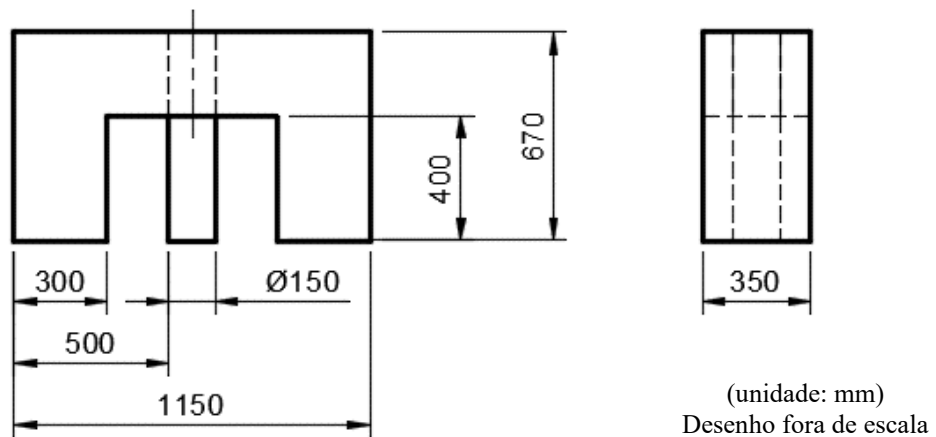
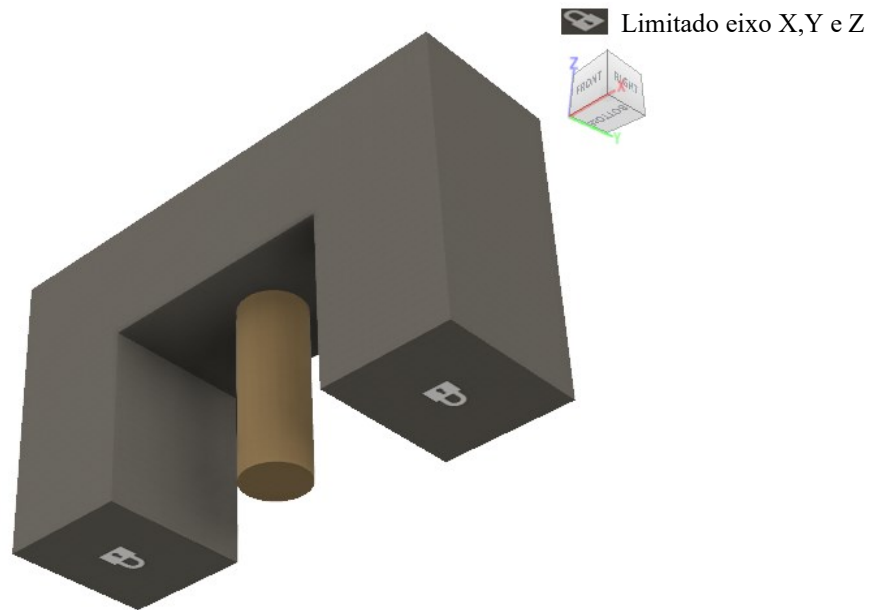


Figura 3.15 – Engastamento na EP.

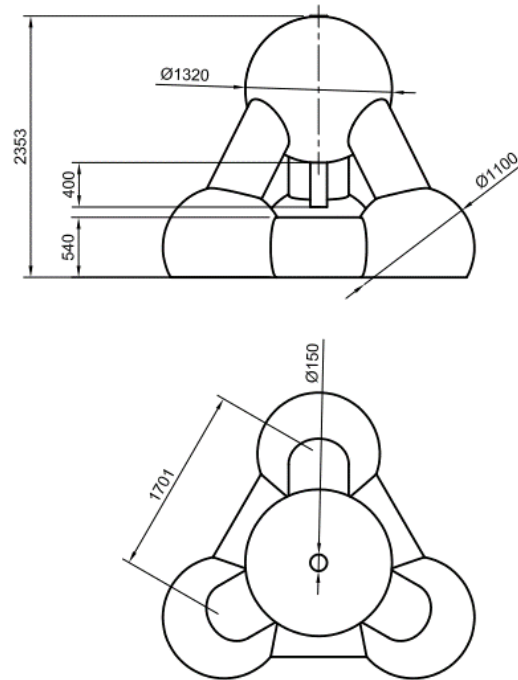


A ET foi projetada de modo a formar um tetraedro de triângulos equiláteros unidos por esferas. As esferas têm o objetivo de melhorar a distribuição de tensão. As três esferas inferiores possuem o mesmo diâmetro de 1 100 mm, a base de uma delas foi engastada e as outras duas foram fixadas apenas no eixo Z, de acordo com a Figura 3.17.

A esfera superior possui diâmetro de 1 320 mm e é a responsável pelo alojamento do SP de comprimento 1 700 mm que transpassa verticalmente o centro da esfera superior. O triângulo equilátero formado na base possui arestas com comprimento de 1 701 mm e os cilindros centrados nestas arestas, unindo as esferas, possuem diâmetro de 540 mm. A ET é apresentada na Figura 3.16.

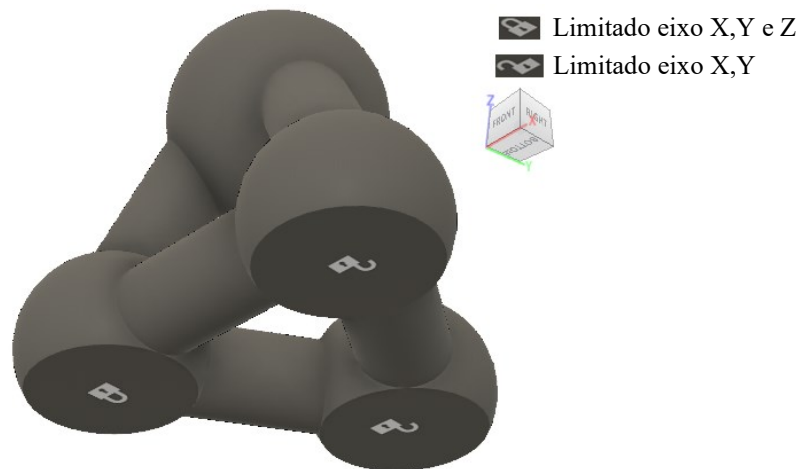


Figura 3.16 – Projeto da estrutura tetraédrica (ET).



(unidade: mm)  
Desenho fora de escala

Figura 3.17 – Engastamento na ET.



O desenho técnico simplificado da EO é apresentado na Figura 3.18, composto por seis triângulos equiláteros, tendo suas colunas com o mesmo comprimento e diâmetro. O SP possui comprimento de 1 000 mm está limitado por um segundo cilindro que pertence à estrutura e possui diâmetro de 400 mm e comprimento de 600 mm.

As esferas inferiores possuem diâmetro de 1 230 mm, as esferas superiores diâmetro de 1 270 mm. As arestas dos triângulos equiláteros que formam a estrutura medem 1 993 mm e os cilindros centrados nestas arestas possuem diâmetro de 650 mm. A base de uma das esferas

inferiores foi engastada nos três eixos e as bases das outras duas esferas inferiores foram engastadas apenas no eixo Z, de acordo com a Figura 3.19.

Figura 3.18 – Projeto da estrutura octaédrica (EO).

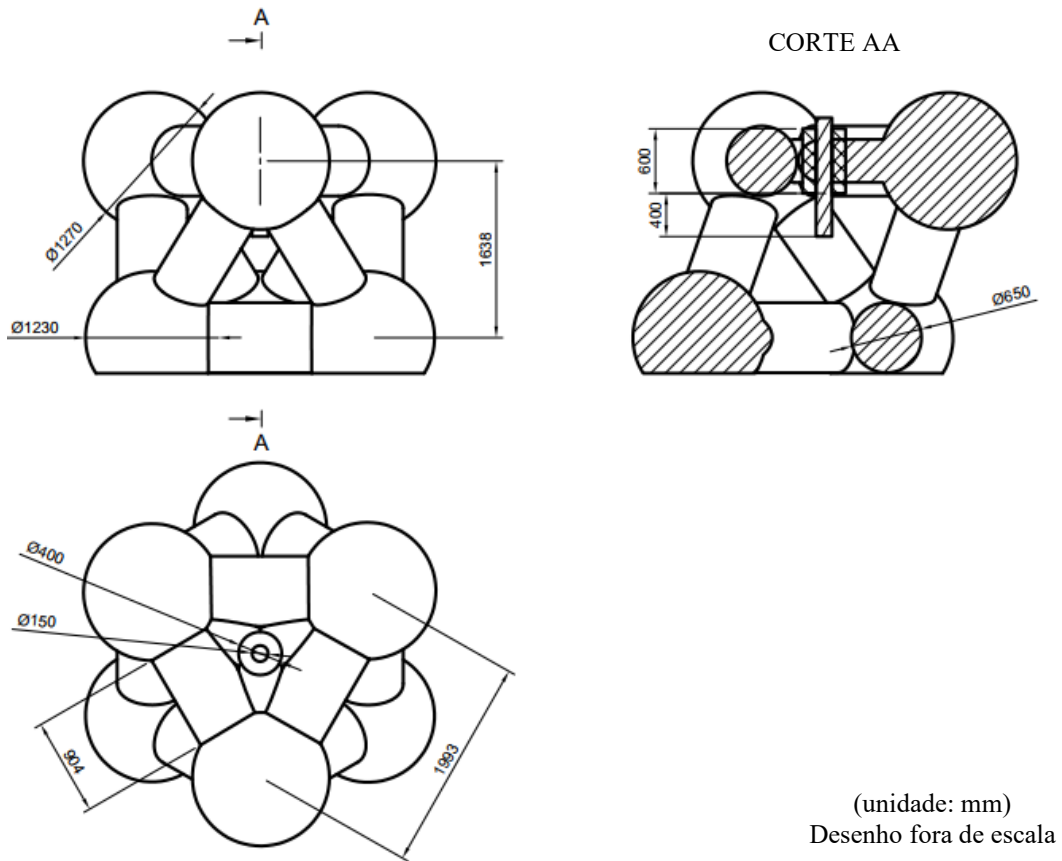
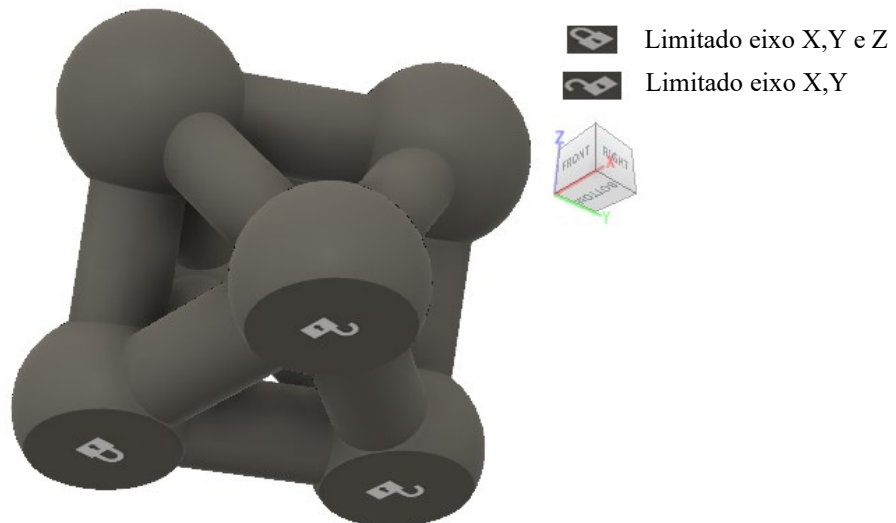


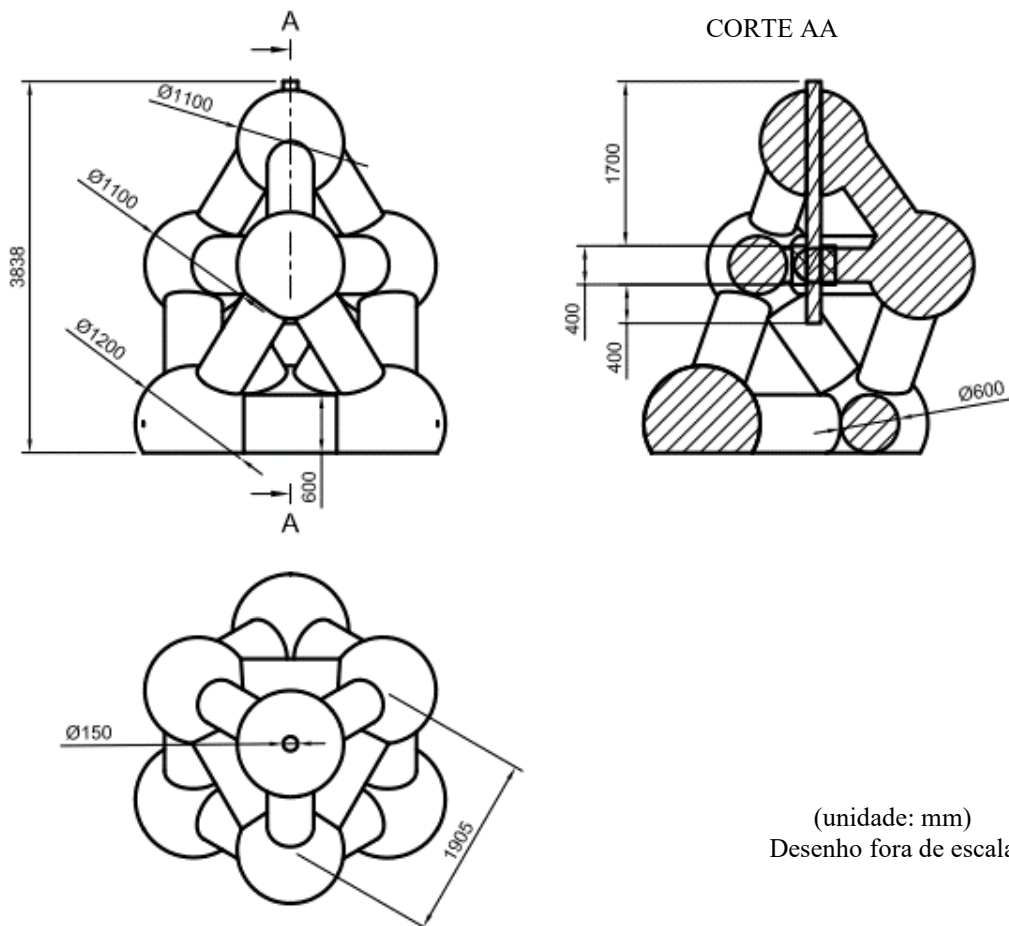
Figura 3.19 – Engastamento na EO.



A estrutura EOT, apresentada na Figura 3.20, foi planejada a partir da junção de dois conceitos, EO e ET. O octaedro é encontrado na parte inferior da estrutura e o tetraedro está na parte superior da estrutura. O SP possui comprimento de 2 500 mm e diâmetro de 150 mm e está limitado pela estrutura em dois pontos, o cilindro localizado na parte superior do octaedro com comprimento de 400 mm e diâmetro de 400 mm e a esfera localizada na parte superior da estrutura que possui diâmetro de 1 100 mm. Os triângulos equiláteros que formam a estrutura possuem arestas com comprimento de 1 905 mm e os cilindros centrados nestas arestas possuem diâmetro de 600 mm.

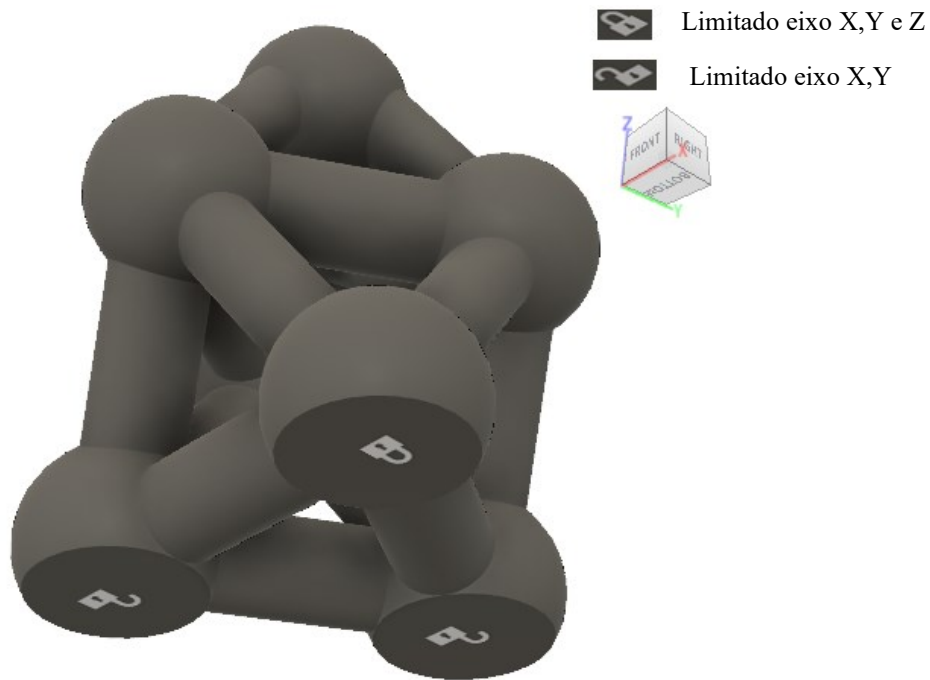
As esferas da base da estrutura possuem diâmetro de 1 200 mm e as demais esferas possuem diâmetro de 1 100 mm. A base de uma de suas esferas inferiores foi engastada e a base de suas outras duas esferas foram limitadas no sentido do eixo Z, conforme Figura 3.21.

Figura 3.20 – Projeto da estrutura similar a octaédrica mais tetraédrica (EOT).



(unidade: mm)  
Desenho fora de escala

Figura 3.21 – Engastamento na EOT.



A estrutura ETD, apresentada na Figura 3.22, foi elaborada a partir da junção de dois tetraedros. O SP possui comprimento de 3 600 mm e diâmetro de 150 mm e está limitado pela estrutura em dois pontos, sendo estes pontos a esfera superior do tetraedro menor a qual possui diâmetro de 1 400 mm e a esfera superior do tetraedro maior a qual possui diâmetro de 1 600 mm.

As arestas dos triângulos equiláteros do tetraedro menor possuem comprimento de 1 225 mm e os cilindros centrados nestas arestas possuem diâmetro de 610 mm. As esferas inferiores do tetraedro menor possuem diâmetro de 1 020 mm.

As arestas dos triângulos equiláteros do tetraedro maior possuem comprimento de 4 054 mm e os cilindros centrados nestas arestas possuem diâmetro de 500 mm. As esferas inferiores do tetraedro maior possuem diâmetro de 900 mm.

Uma esfera inferior de cada um dos dois tetraedros foi engastada, as demais esferas inferiores tiveram seu movimento limitado apenas no eixo Z, de acordo com a Figura 3.23.

Figura 3.22 – Projeto da estrutura tetraédrica dupla (ETD).

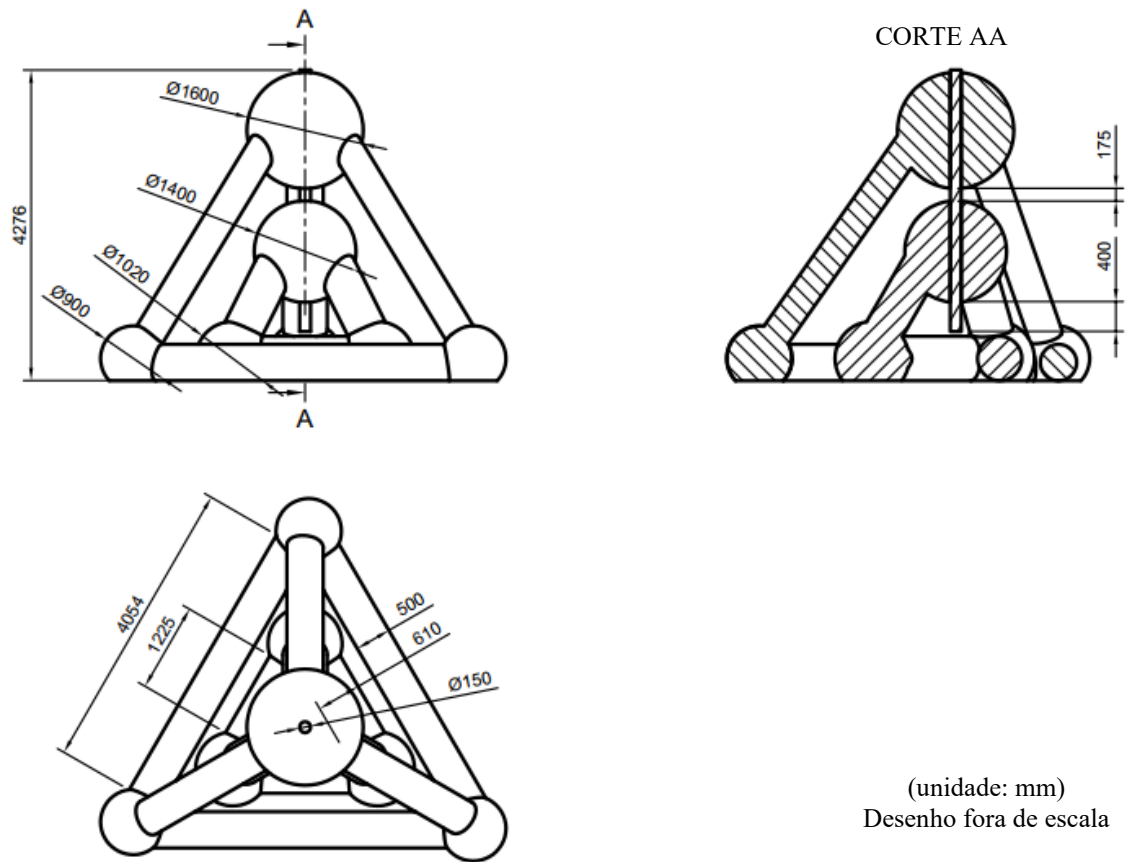
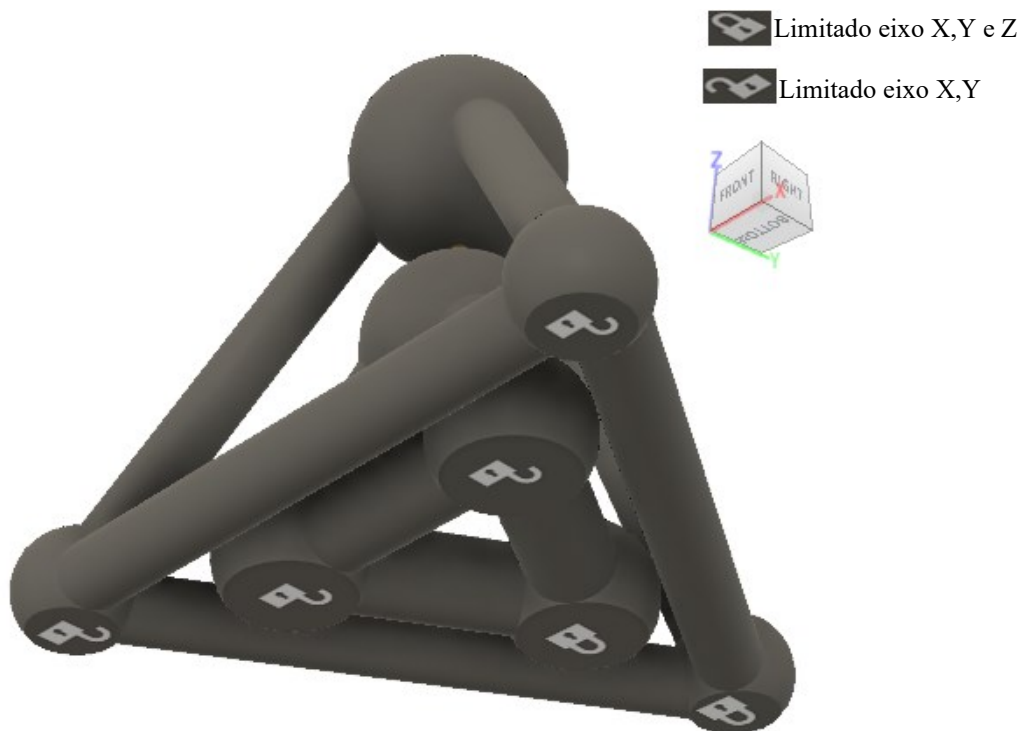


Figura 3.23 – Engastamento na ETD.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

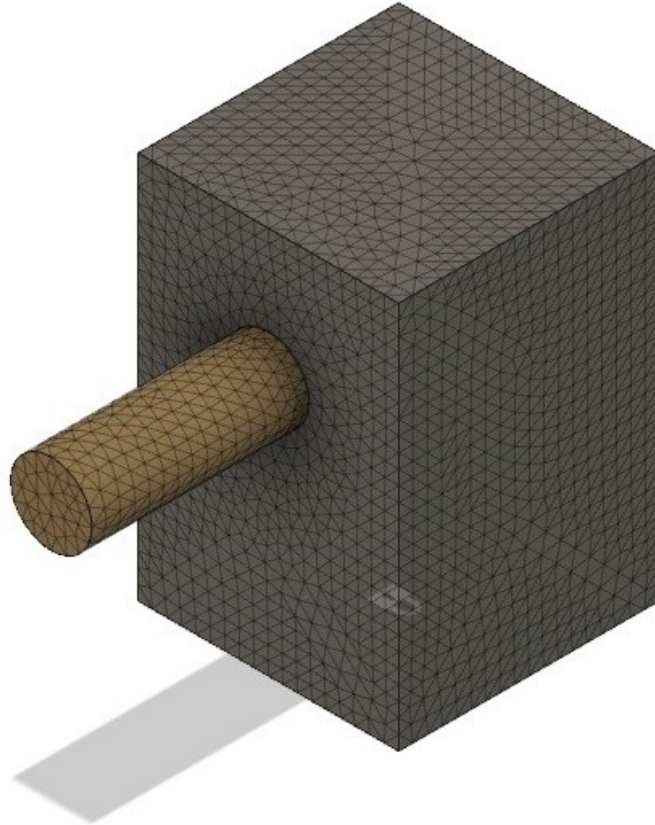
Os resultados deste trabalho foram divididos em oito itens principais, sendo que os seis primeiros estão divididos em dois casos: simulação estática e dinâmica. Essa divisão em itens e subitens tem como intuito auxiliar na organização dos resultados, favorecendo sua compreensão e discussão. Os dois últimos têm como objetivo apresentar as comparações entre as estruturas e as considerações finais.

Nesse contexto, os itens são 4.1 EC, 4.2 EP, 4.3 ET, 4.4 EO, 4.5 ETD, 4.6 EOT, 4.7 comparações entre as estruturas e 4.8 considerações finais.

### 4.1 ESTRUTURA EM C

A malha nesta simulação apresentou 107 401 nós e 74 039 elementos representados na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Malha gerada para estrutura em C (EC).



#### 4.1.1 Simulação estática da estrutura em C

Os valores das deformações após a aplicação das forças, encontrados na simulação estática apresentados na Tabela 4.1, sendo a situação crítica, da simulação com a força de usinagem, o caso 5. Para o caso onde as forças de usinagem e da gravidade foram aplicadas simultaneamente, tem-se como resultado o caso 4.

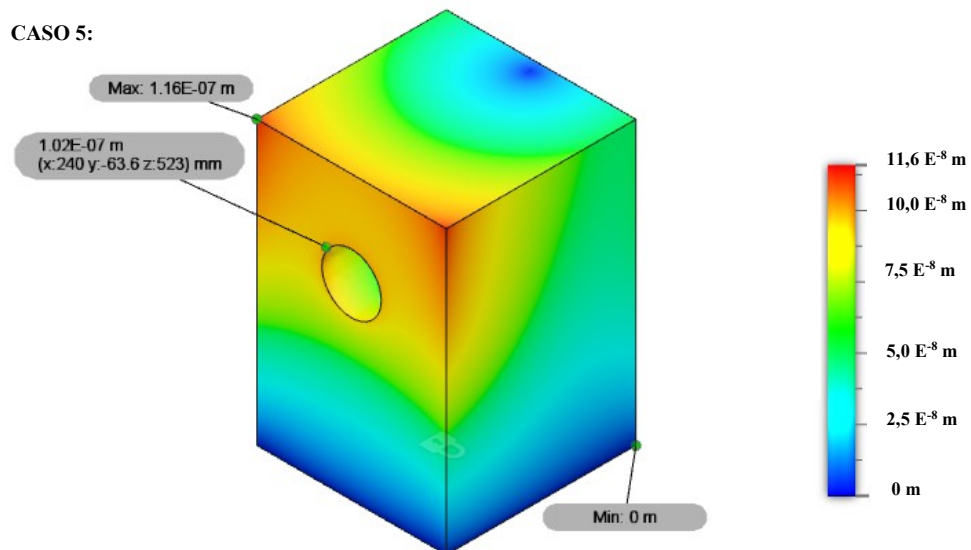
Tabela 4.1 – Deformações obtidas a partir da simulação estática da estrutura em c (EC).

Forças aplicadas na simulação	Deformação a partir da força de usinagem ( $E^{-8}$ m)	Deformação a partir da força da gravidade e de usinagem ( $E^{-8}$ m)
Deformação Caso 1	8,70	15,2
Deformação Caso 2	6,60	14,7
Deformação Caso 3	6,50	12,5
Deformação Caso 4	4,20	13,3
Deformação Caso 5	10,20	15,5

A partir da análise da Figura 4.2 observou-se o PCE com deformação na intensidade de  $10,2 E^{-8}$  m, e reduzindo gradativamente no decorrer do corpo da máquina. A base da coluna foi previamente fixada e deste modo sua deformação foi nula nesta região.

Foi observado que as máximas deformações aconteceram nos dois vértices frontais e superiores da coluna, com intensidade de  $11,6 E^{-8}$  m.

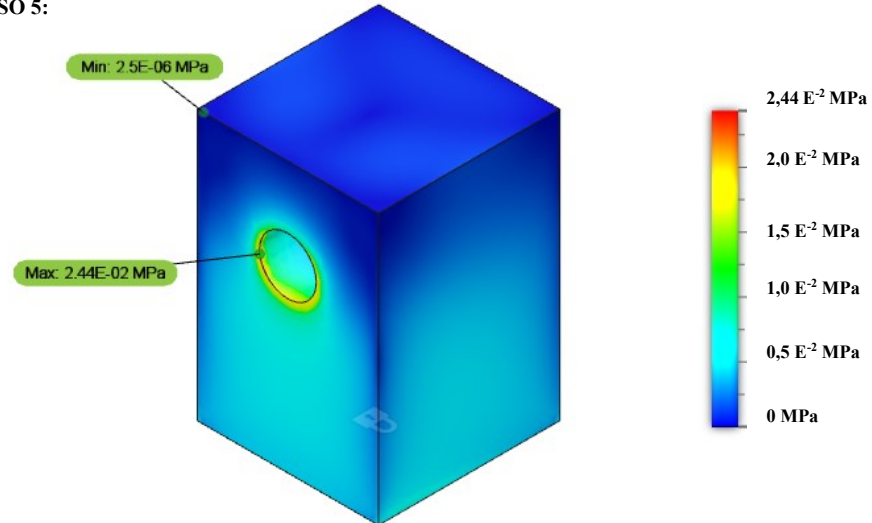
Figura 4.2 – Deformação na estrutura em C (EC) após aplicação de força estática.



Observa-se a partir da Figura 4.3 que as tensões geradas nesta estrutura pela força estática são menores na parte superior. A tensão máxima apresentada possui intensidade de  $2,44 \text{ E}^{-2} \text{ MPa}$  e está localizada na aresta do furo que acopla o SP.

Figura 4.3 – Distribuição de tensão gerada pela aplicação da força estática na estrutura em C (EC).

CASO 5:



As deformações obtidas considerando a ação da gravidade possuem resultante no PCE de  $11,5 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ , como apresentado na Figura 4.4, e a maior tensão nesta estrutura pode ser verificada na Figura 4.5 com intensidade de  $2,83 \text{ E}^{-2} \text{ MPa}$ . Para o ponto de máxima deformação, presente no meio das laterais do topo da estrutura, encontrou-se a intensidade de  $12,9 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ .

Figura 4.4 – Deformação gerada pela ação da gravidade na estrutura em C (EC).

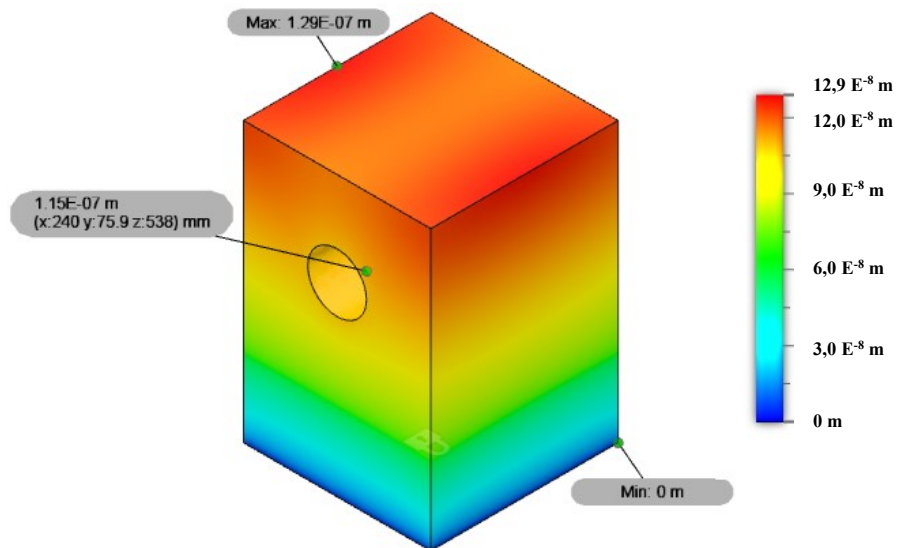
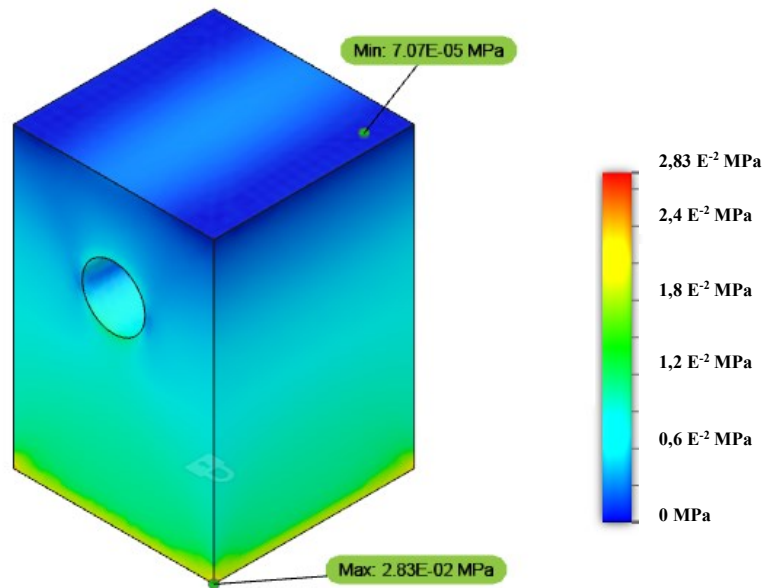




Figura 4.5 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade na estrutura em C (EC).



A deformação no PCE considerando a ação da gravidade e força de usinagem simultaneamente foi de  $15,5 \text{ E}^{-8} \text{ m}$  (Figura 4.6) e a máxima deformação presente na quina superior da estrutura foi de  $18,3 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ .

A máxima tensão foi de  $3,33 \text{ E}^{-2} \text{ MPa}$ , conforme apresentado na Figura 4.7.

Figura 4.6 – Deformação gerada pela ação da gravidade e da força de usinagem simultaneamente na estrutura em C (EC).

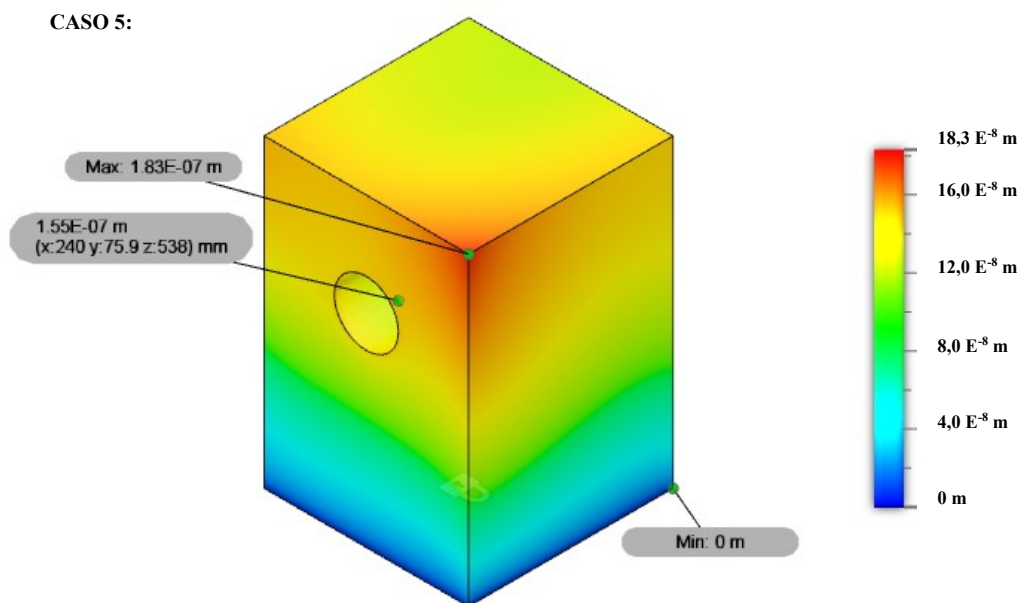
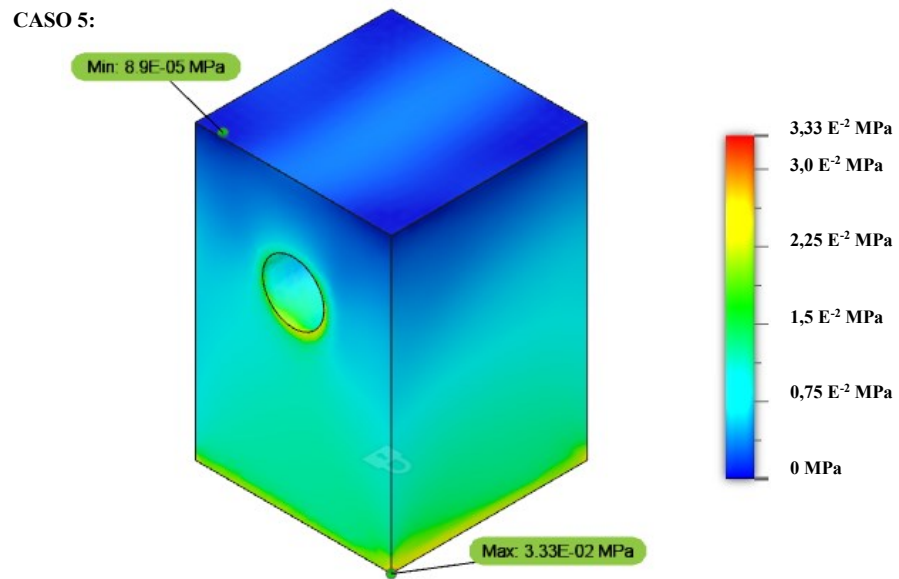


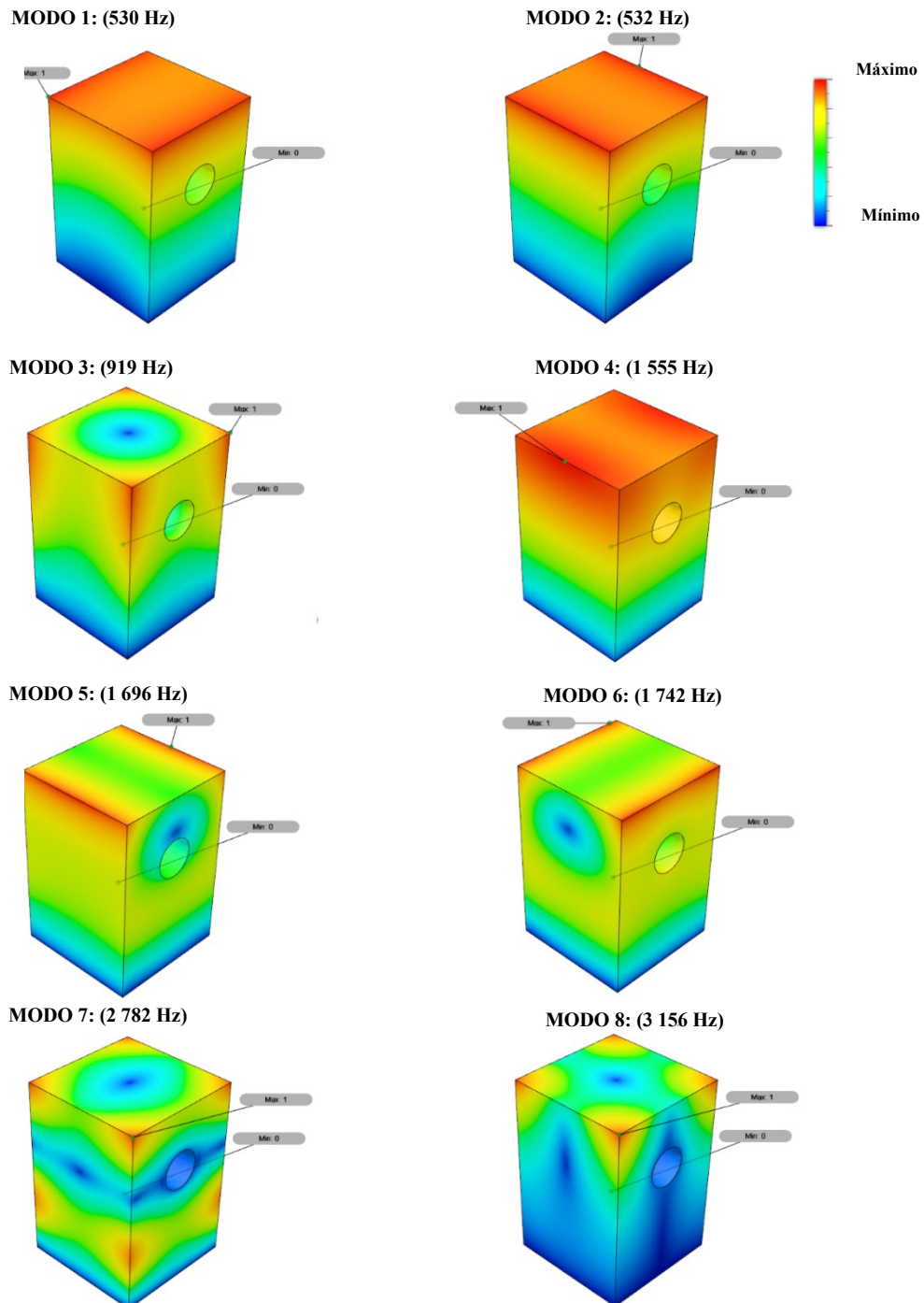
Figura 4.7 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade e aplicação da força de usinagem simultaneamente na estrutura em C (EC).



#### 4.1.2 Simulação dinâmica da estrutura em C.

Os modos de vibração da simulação dinâmica da EC são representados na Figura 4.8. Eles possuem respectivos valores de 530 Hz, 532 Hz, 919 Hz, 1 555 Hz, 1 696 Hz, 1 742 Hz, 2 782 Hz e 3 156 Hz como os oito modos de vibração.

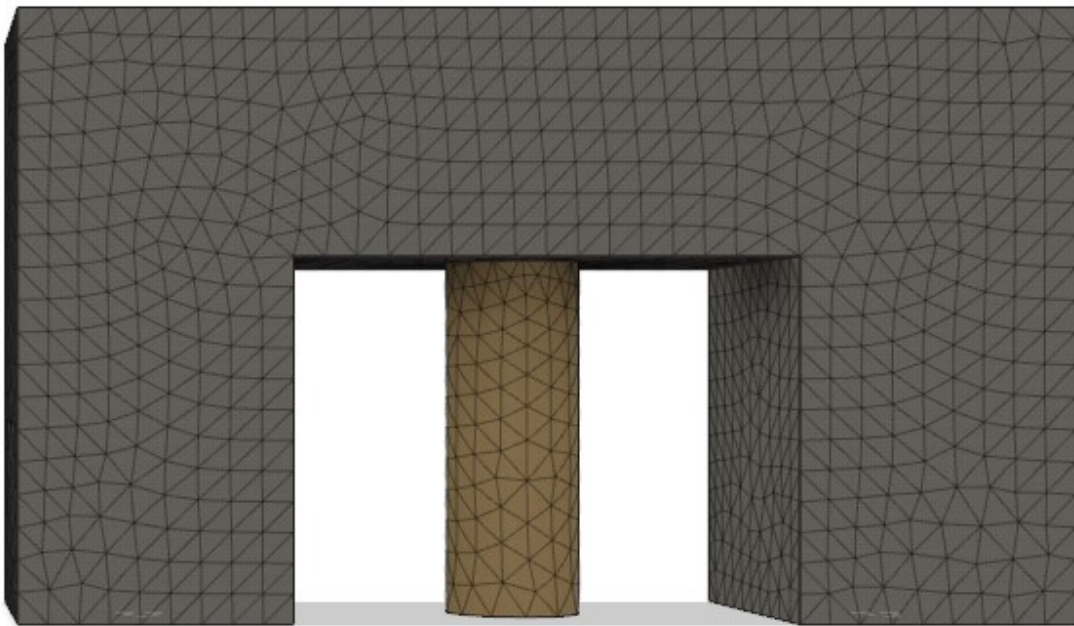
Figura 4.8 – Simulação dinâmica com frequências naturais na estrutura em C (EC).



## 4.2 ESTRUTURA PÓRTICO

As simulações na EP utilizaram 52 606 nós e 35 138 elementos, assim como apresentado na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Malha gerada para estrutura de pórtico (EP).



### 4.2.1 Simulação estática para estrutura pórtico.

Os valores encontrados na simulação estática apresentados na Tabela 4.2, sendo a situação crítica, da simulação com a força de usinagem, o caso 5. Para o caso onde as forças de usinagem e da gravidade estão aplicadas simultaneamente, tem-se como resultado o caso 2.

Tabela 4.2 – Deformações obtidas a partir da simulação estática da estrutura em pórtico (EP).

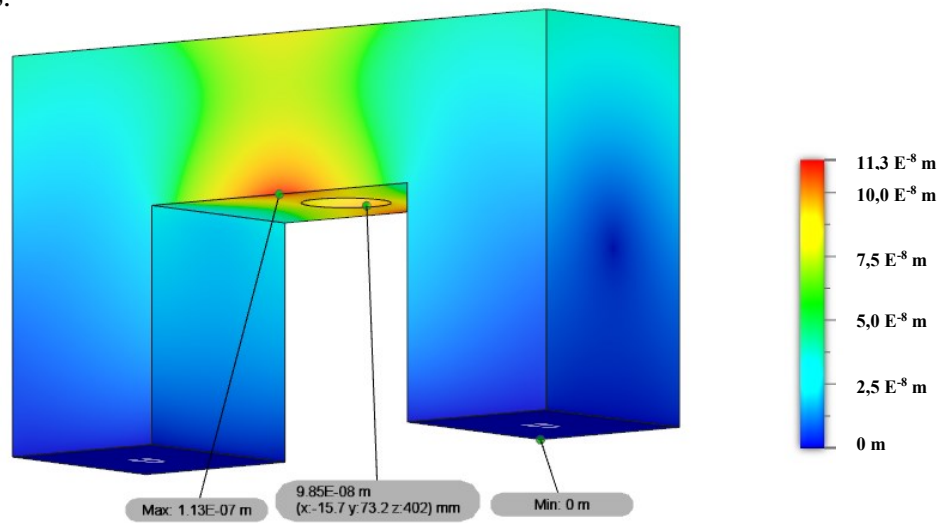
Forças aplicadas na simulação	Deformação a partir da força de usinagem ( $E^{-8}$ m)	Deformação a partir da força da gravidade e de usinagem ( $E^{-8}$ m)
Deformação Caso 1	2,90	31,6
Deformação Caso 2	8,20	39,3
Deformação Caso 3	8,20	31,1
Deformação Caso 4	8,50	35,7
Deformação Caso 5	9,85	31,1

As deformações apresentadas na Figura 4.10 foram mais intensas na aresta do meio da viga horizontal da máquina e sofreram redução ao se aproximarem das colunas laterais.

As bases das colunas foram previamente fixadas e suas deformações foram nulas. O PCE apresentou deformação de  $9,85 \text{ E-}8 \text{ m}$  e a deformação máxima na aresta da estrutura foi de  $11,3 \text{ E-}8 \text{ m}$ .

Figura 4.10 – Deformação após aplicação de força estática na estrutura pórtico (EP).

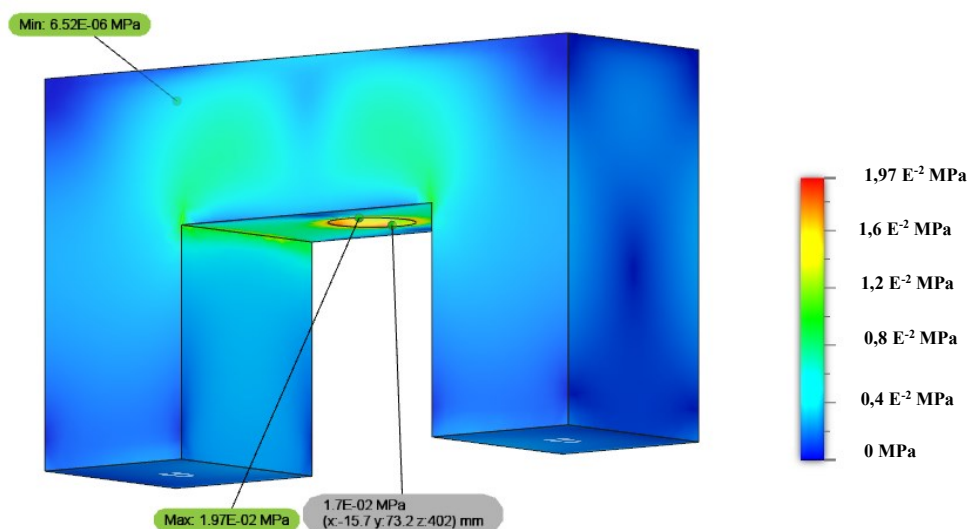
CASO 5:



Com relação as tensões geradas pela aplicação da força estática, apresentada na Figura 4.11, observou-se que a tensão no PCE foi de  $1,97 \text{ E-}2 \text{ MPa}$  sendo essa a tensão máxima na estrutura.

Figura 4.11 – Distribuição de tensão gerada pela aplicação da força estática na estrutura pórtico (EP).

CASO 5:



A deformação máxima considerando a ação da gravidade foi de  $35,5 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ , como apresentado na Figura 4.12, localizou-se no meio da coluna horizontal, enquanto no PCE foi de  $34,4 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ . As tensões encontradas são apresentadas na Figura 4.13 alcançando máxima de  $4,21 \text{ E}^{-2} \text{ MPa}$  na parte interna da coluna.

Figura 4.12 – Deformação gerada pela ação da gravidade na estrutura em pórtico (EP).

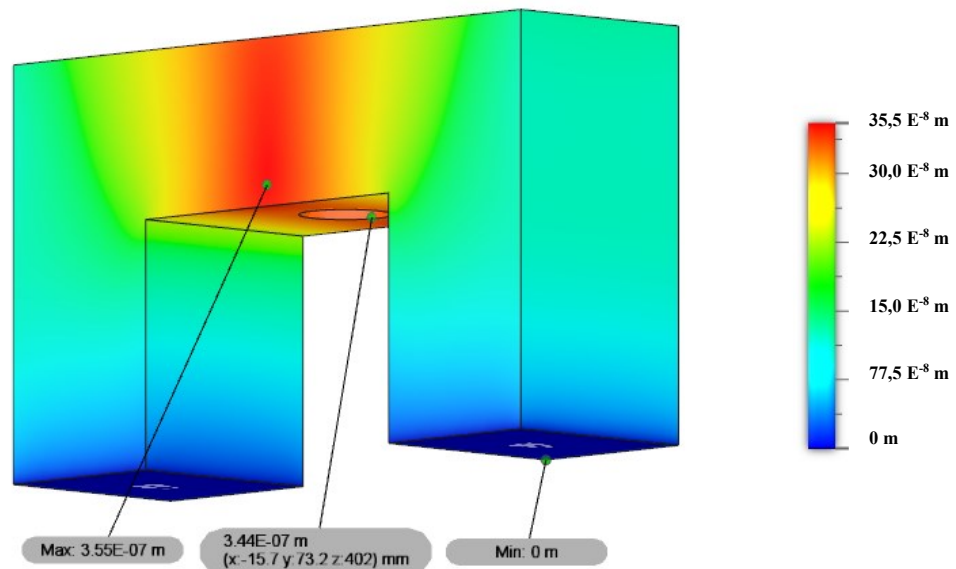
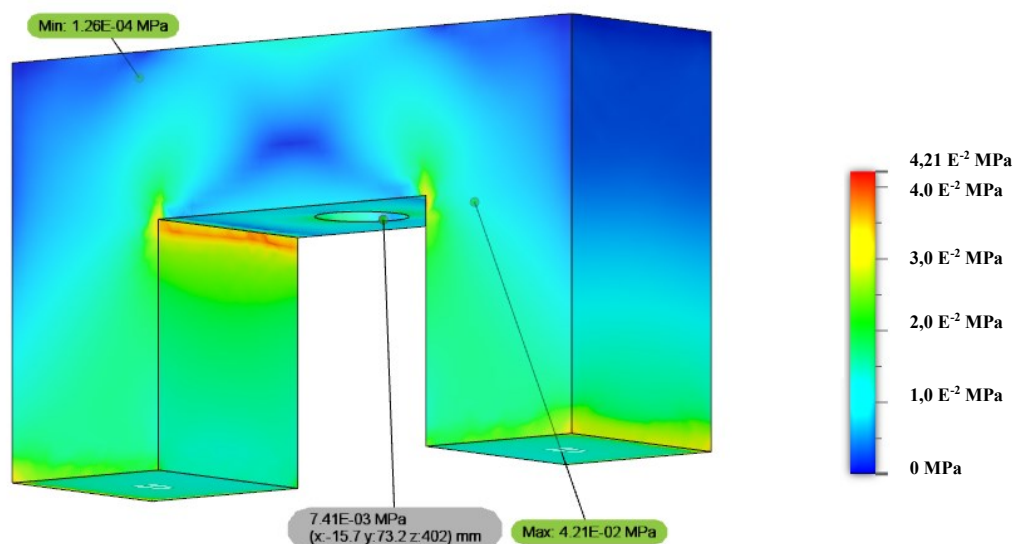


Figura 4.13 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade na estrutura em pórtico (EP).



A deformação máxima obtida na estrutura considerando a ação da gravidade e força de usinagem, simultaneamente, foi de  $42,1 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ , localizada na aresta inferior da coluna

horizontal da estrutura. No PCE foi de  $39,0 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ , como apresentado na Figura 4.14. As tensões são ilustradas na Figura 4.15, alcançando máxima de  $4,77 \text{ E}^{-2} \text{ MPa}$ .

Figura 4.14 – Deformação gerada pela ação da força de corte mais a gravidade na estrutura em pórtico (EP).

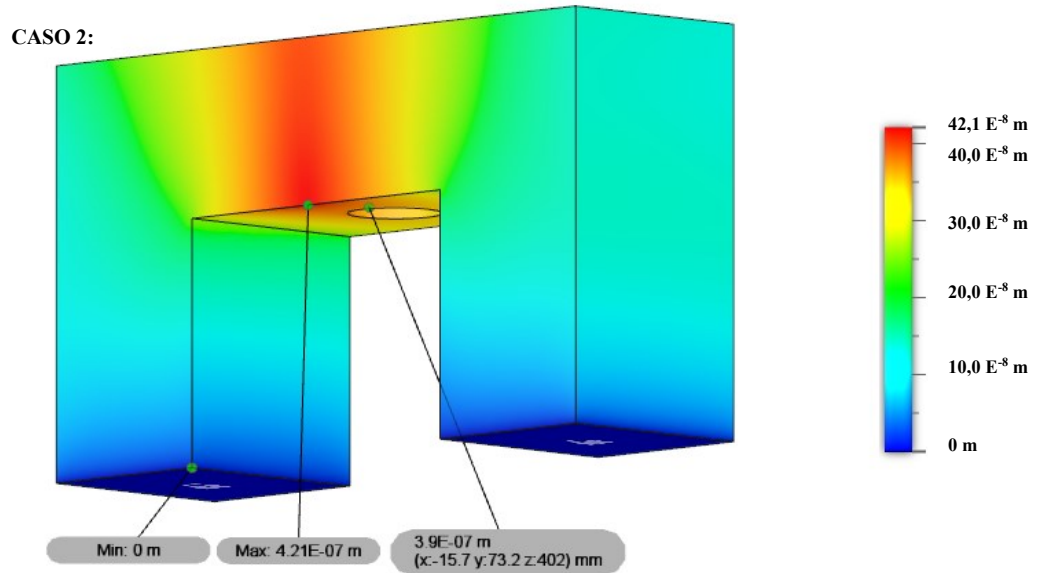
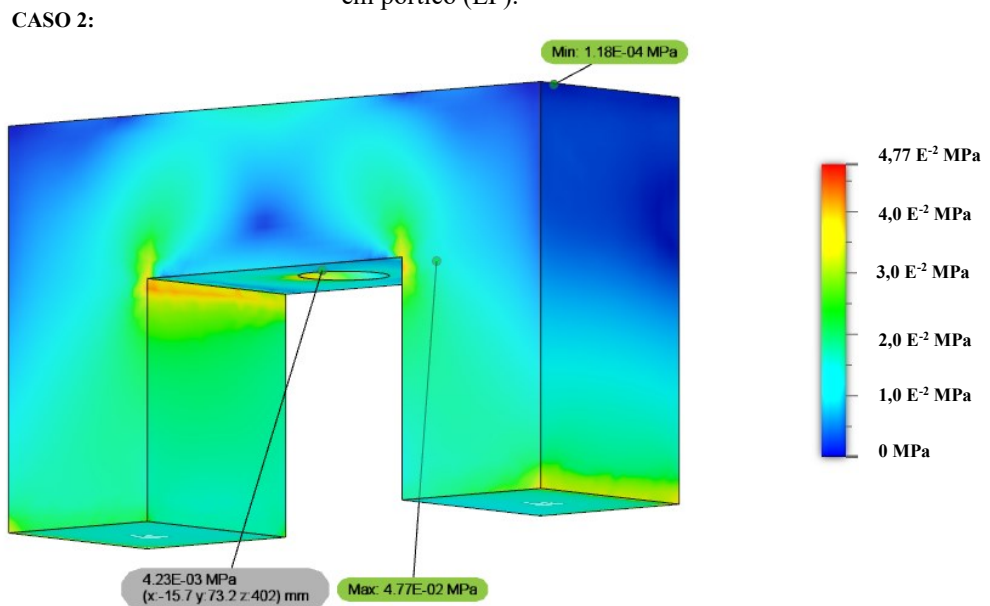


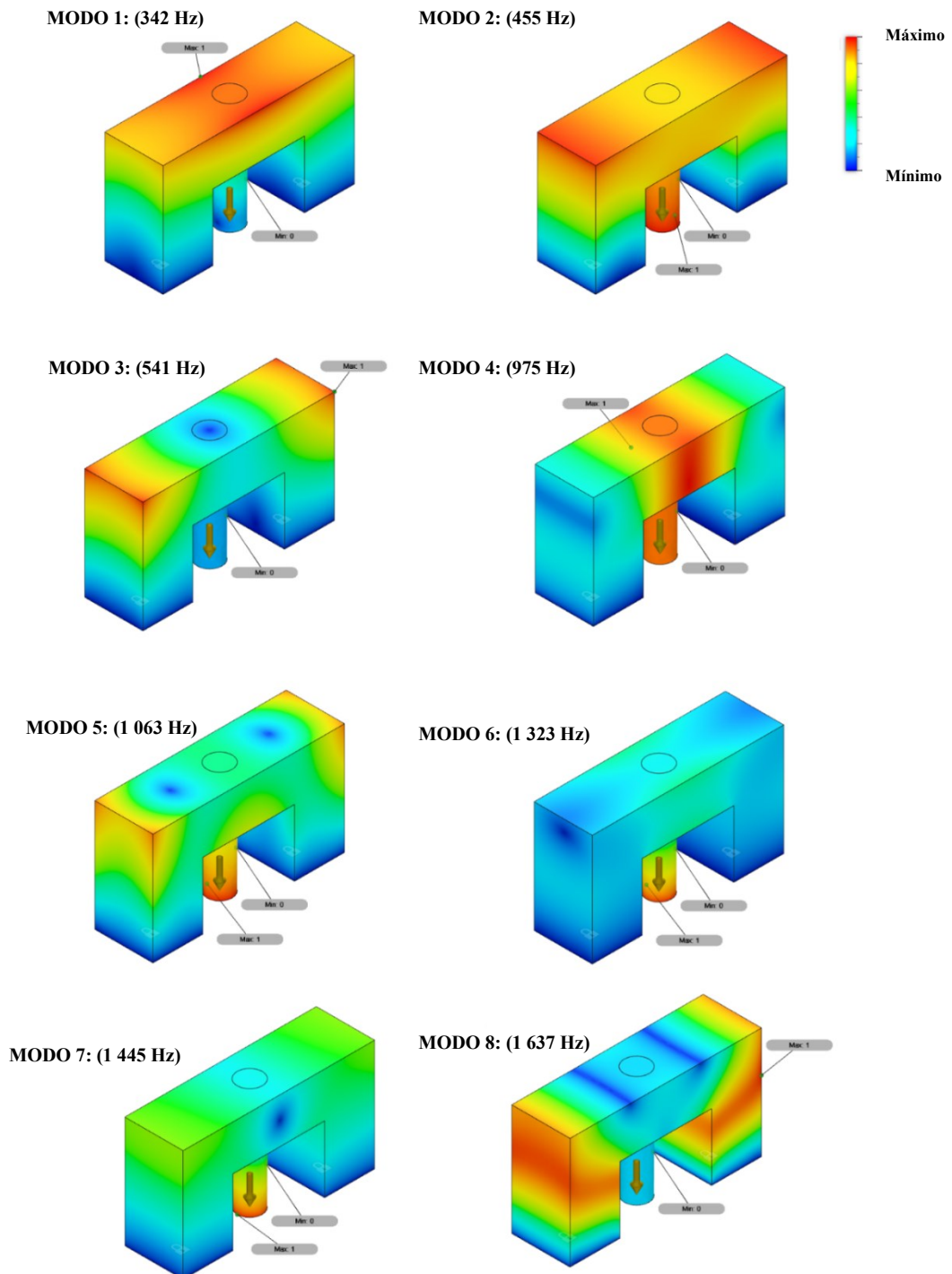
Figura 4.15 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade e aplicação da força de usinagem na estrutura em pórtico (EP).



#### 4.2.2 Simulação dinâmica da estrutura pórtico.

Os modos de vibração da simulação dinâmica da EP são representados na Figura 4.16. Eles possuem os respectivos valores de 342 Hz, 455 Hz, 541 Hz, 975 Hz, 1 063 Hz, 1 323 Hz, 1 445 Hz e 1 637 Hz.

Figura 4.16 – Simulação dinâmica com frequências naturais na estrutura pórtico (EP).

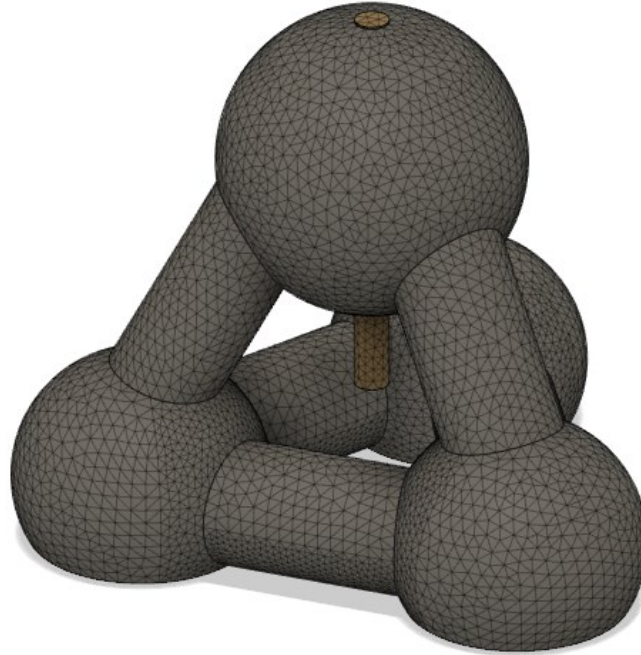




### 4.3 ESTRUTURA TETRAÉDRICA

A simulação da ET apresentou 69 914 nós e 47 202 elementos, apresentados na Figura 4.17.

Figura 4.17 – Malha gerada para estrutura tetraédrica (ET).



#### 4.3.1 Simulação estática da estrutura tetraédrica.

Os valores de deformação encontrados na simulação estática apresentados na Tabela 4.3, sendo a situação crítica, da simulação com a força de usinagem, o caso 5. Para o caso em que as forças de usinagem e de gravidade estão aplicadas simultaneamente, tem-se como caso crítico o caso 5.

Tabela 4.3 – Deformação estática para estrutura tetraédrica (ET).

Forças aplicadas na simulação	Deformação a partir da força de usinagem ( $E^{-8}$ m)	Deformação a partir da força da gravidade e de usinagem ( $E^{-8}$ m)
Deformação Caso 1	1,00	238,0
Deformação Caso 2	5,45	239,0
Deformação Caso 3	5,45	239,0
Deformação Caso 4	7,45	238,0
Deformação Caso 5	9,82	241,0

As deformações apresentadas na Figura 4.18 mostram-se mais intensas no cilindro que une as esferas opostas a esfera engastada. O PCE apresentou uma deformação de  $9,82 \text{ E}^{-8} \text{ m}$  e a máxima deformação encontrada na estrutura foi de  $9,98 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ .

Com relação às tensões geradas pela aplicação da força estática, apresentadas na Figura 4.19, observou-se que a máxima tensão foi de  $6,5 \text{ E}^{-2} \text{ MPa}$ .

Figura 4.18 – Deformação após aplicação de força estática na estrutura tetraédrica (ET).

CASO 5:

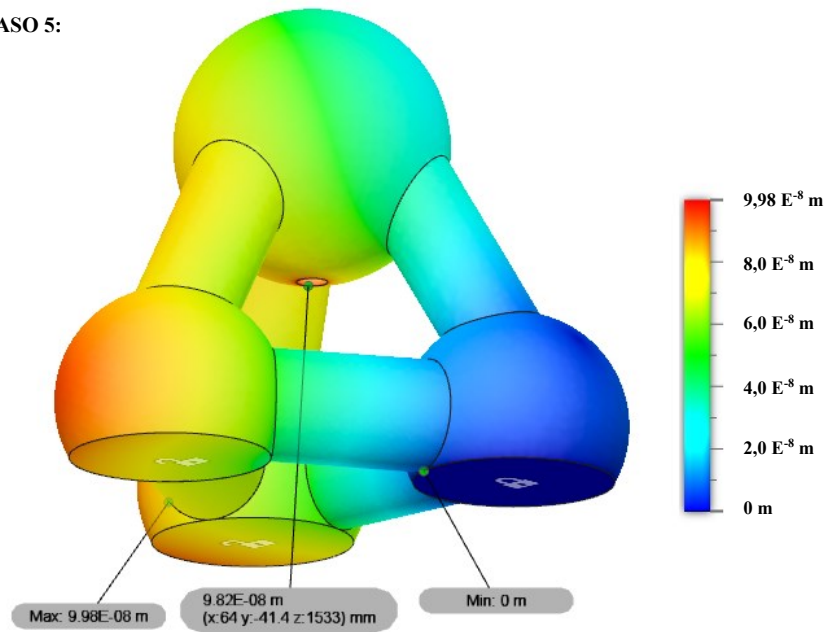
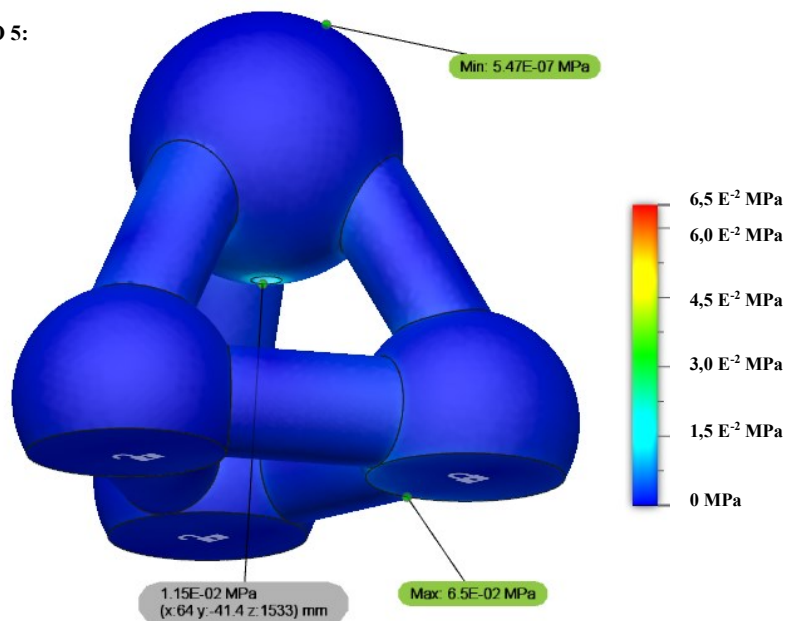


Figura 4.19 – Distribuição de tensão gerada pela aplicação da força estática na estrutura tetraédrica (ET).

CASO 5:



A deformação máxima considerando a ação da gravidade foi de  $241 \text{ E}^{-8} \text{ m}$  na esfera superior da estrutura, e no PCE foi de  $239 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ , como apresentado na Figura 4.20. As tensões são mostradas na Figura 4.21 alcançando máxima de  $280 \text{ E}^{-2} \text{ MPa}$  na base da estrutura.

Figura 4.20 – Deformação gerada pela ação da gravidade da estrutura tetraédrica (ET).

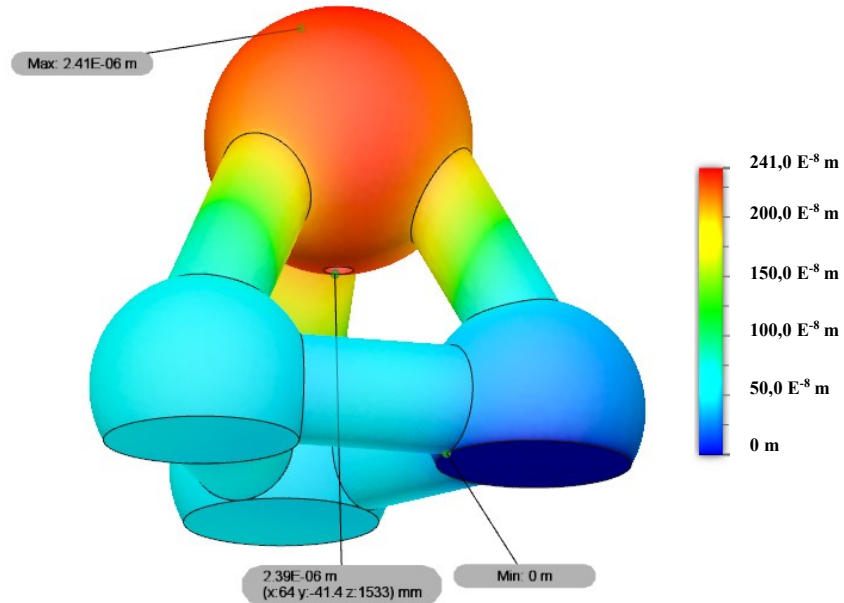
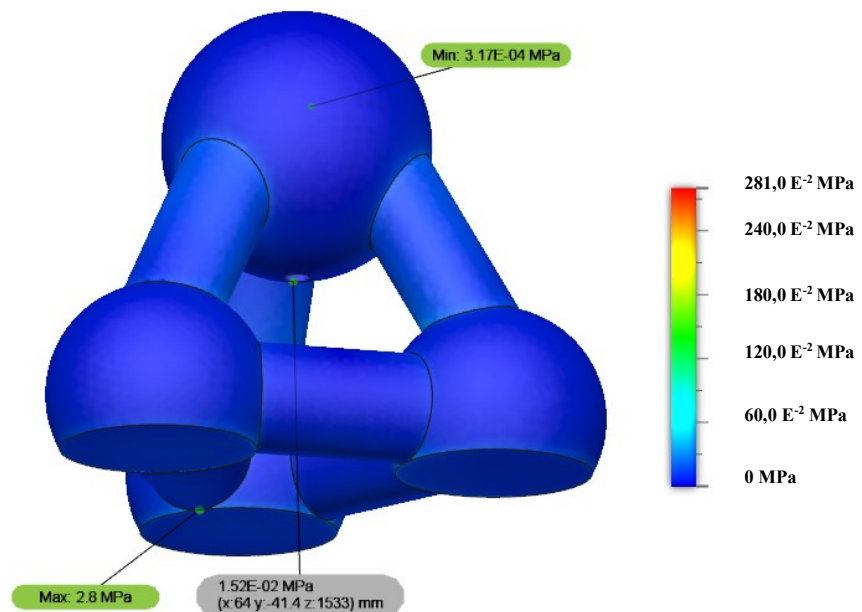


Figura 4.21 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade da estrutura tetraédrica (ET).



A deformação máxima obtida na estrutura considerando a ação da gravidade e força de usinagem, simultaneamente, foi de  $242 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ , estando localizada no topo da esfera superior,

e de  $241 \text{ E}^{-8} \text{ m}$  no PCE, como apresentado na Figura 4.22. As tensões são ilustradas na Figura 4.23, alcançando máxima de  $2,81 \text{ E}^{-2} \text{ MPa}$ .

Figura 4.22 – Deformação gerada pela ação da gravidade mais a força de usinagem na estrutura tetraédrica (ET).

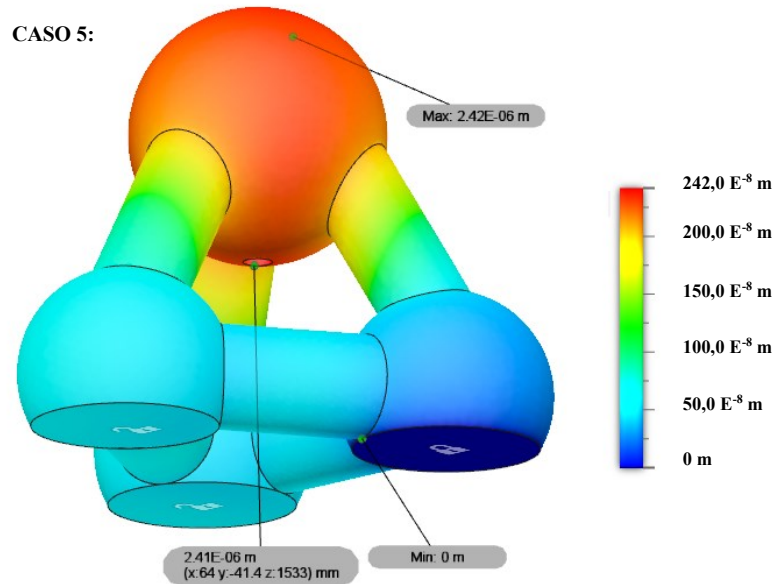
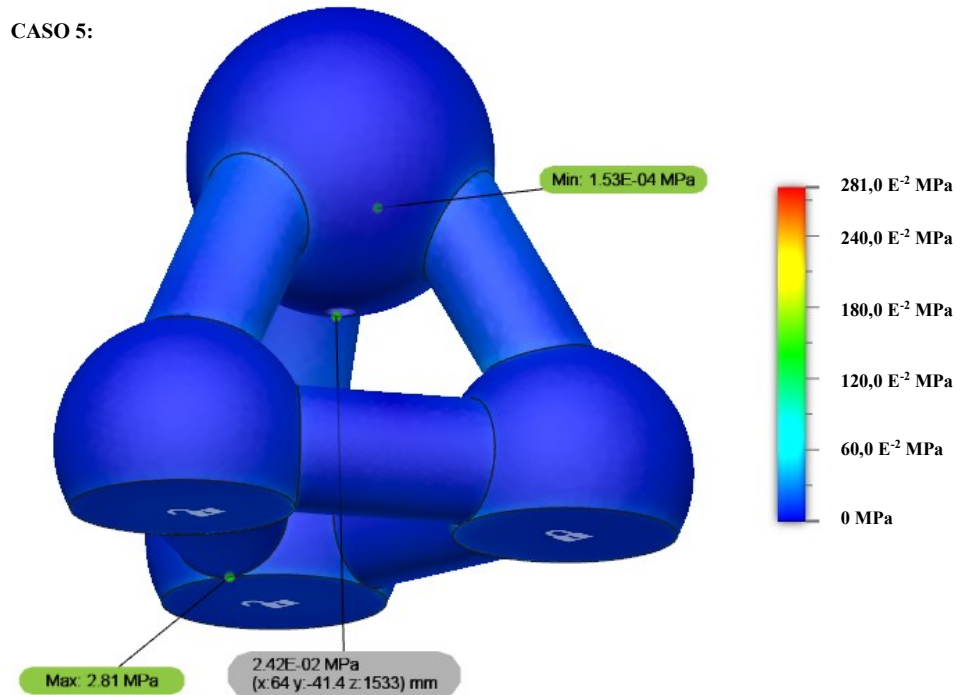


Figura 4.23 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade e aplicação da força de usinagem na estrutura tetraédrica (ET).

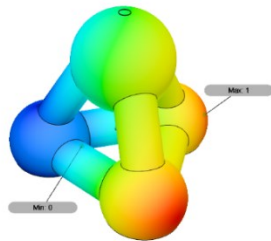


### 4.3.2 Simulação dinâmica da estrutura tetraédrica

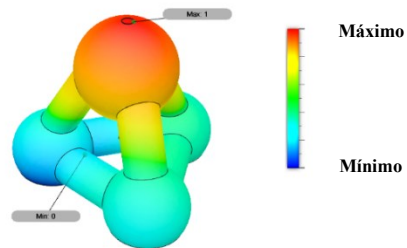
Os modos de vibração da simulação dinâmica da ET são apresentados na Figura 4.24. Eles possuem os respectivos valores de 57,3 Hz, 166 Hz, 195 Hz, 284 Hz, 299 Hz, 345 Hz, 373 Hz e 396 Hz.

Figura 4.24 – Simulação dinâmica com frequências naturais na estrutura tetraédrica (ET).

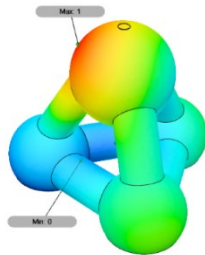
**MODO 1: (57,3Hz)**



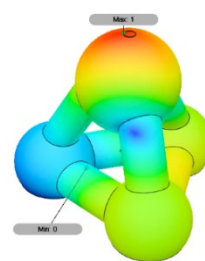
**MODO 2: (166 Hz)**



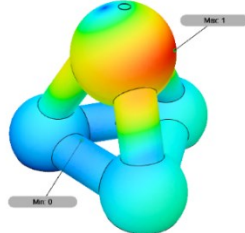
**MODO 3: (195 Hz)**



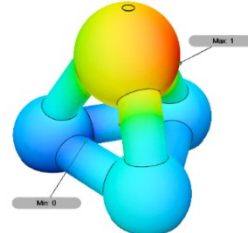
**MODO 4: (284 Hz)**



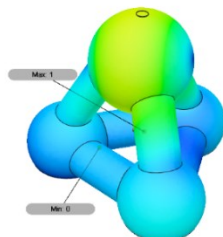
**MODO 5: (299 Hz)**



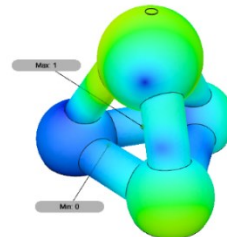
**MODO 6: (345 Hz)**



**MODO 7: (373 Hz)**



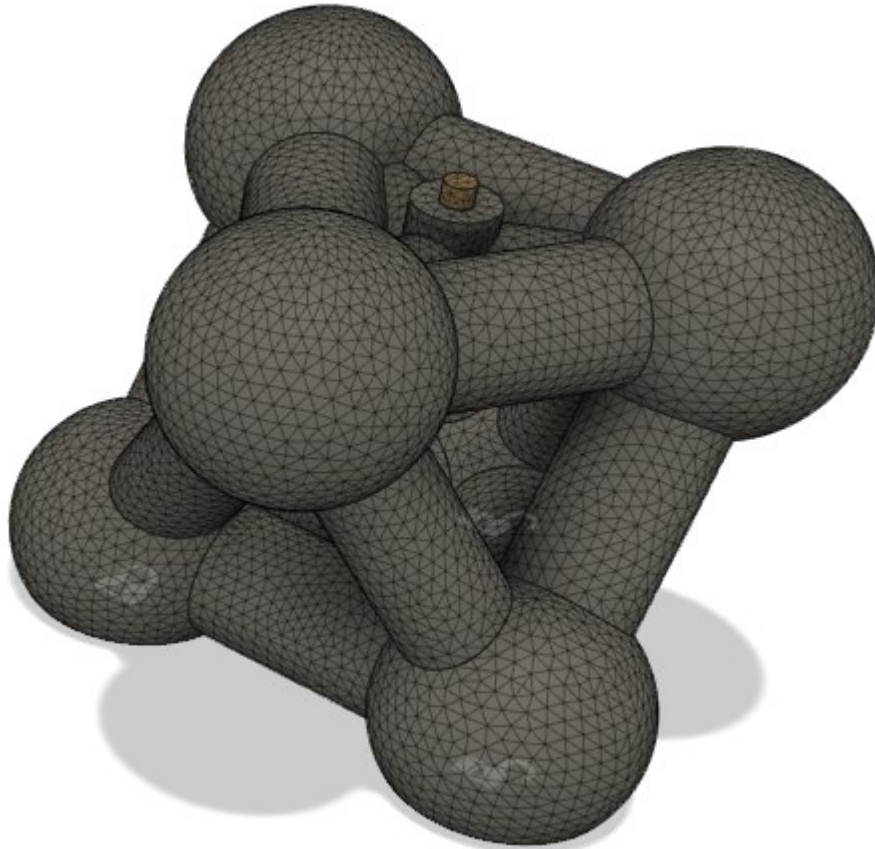
**MODO 8: (396 Hz)**



#### 4.4 ESTRUTURA OCTAÉDRICA

As simulações na EO utilizaram 238 270 nós e 163 333 elementos, assim como apresentado na Figura 4.25.

Figura 4.25 – Malha gerada para a estrutura octaédrica (EO).



##### 4.4.1 Simulação estática da estrutura octaédrica.

Os valores de deformação encontrados na simulação estática apresentados na Tabela 4.4, sendo a situação crítica, da simulação com a força de usinagem, o caso 5. Para o caso onde as forças de usinagem e da gravidade estão aplicadas simultaneamente, tem-se como caso crítico o caso 5.

Tabela 4.4 – Deformação obtida para a simulação estática para estrutura octaédrica (EO).

Forças aplicadas na simulação	Deformação a partir da força de usinagem ( $E^{-8}$ m)	Deformação a partir da força da gravidade e de usinagem ( $E^{-8}$ m)
Deformação Caso 1	1,80	513,0
Deformação Caso 2	5,20	515,0
Deformação Caso 3	5,20	514,0
Deformação Caso 4	7,00	514,0
Deformação Caso 5	9,40	517,0

Para possibilitar a visualização das regiões internas da estrutura, foi realizado um corte na estrutura apresentado nas Figura 4.27, 4.30 e 4.33.

A partir da análise da Figura 4.26 observou-se que esta simulação apresentou a maior deformação na esfera superior oposta ao lado engastado na intensidade de  $10,3 E^{-8}$  m. A partir do corte apresentado na Figura 4.27 verificou-se que a deformação no PCE foi de  $9,43 E^{-8}$  m.

Com relação as tensões geradas pela aplicação da força estática, apresentadas na Figura 4.28, observou-se que a tensão máxima foi de  $1,15 E^{-2}$  MPa.

Figura 4.26 – Deformação após aplicação de força de usinagem na estrutura octaédrica (EO).

CASO 5:

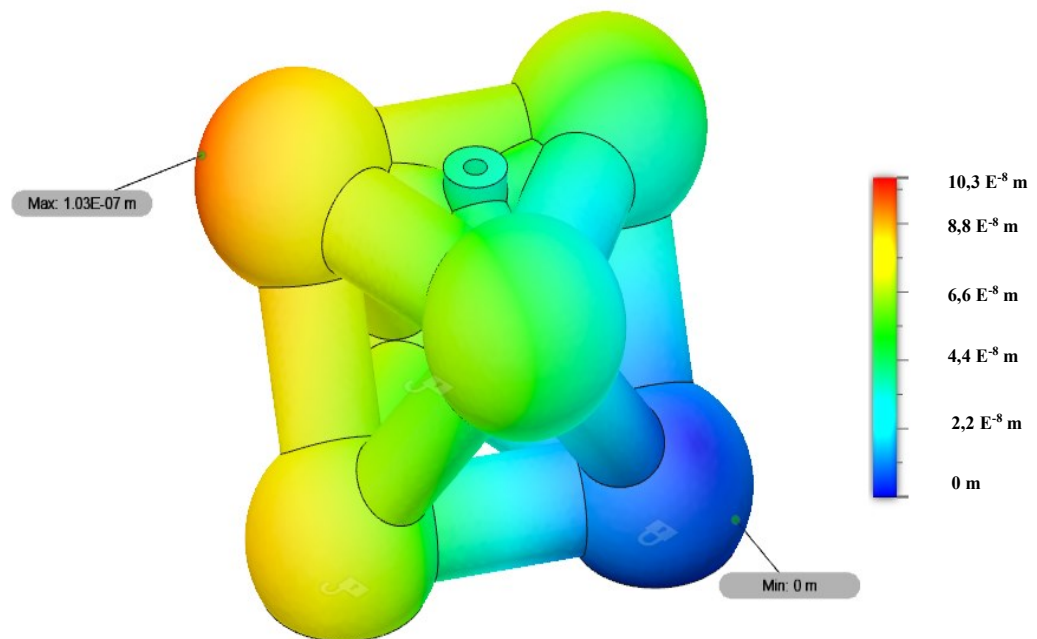


Figura 4.27 – Corte na estrutura octaédrica para análise de deformação após aplicação de força de usinagem (EO).

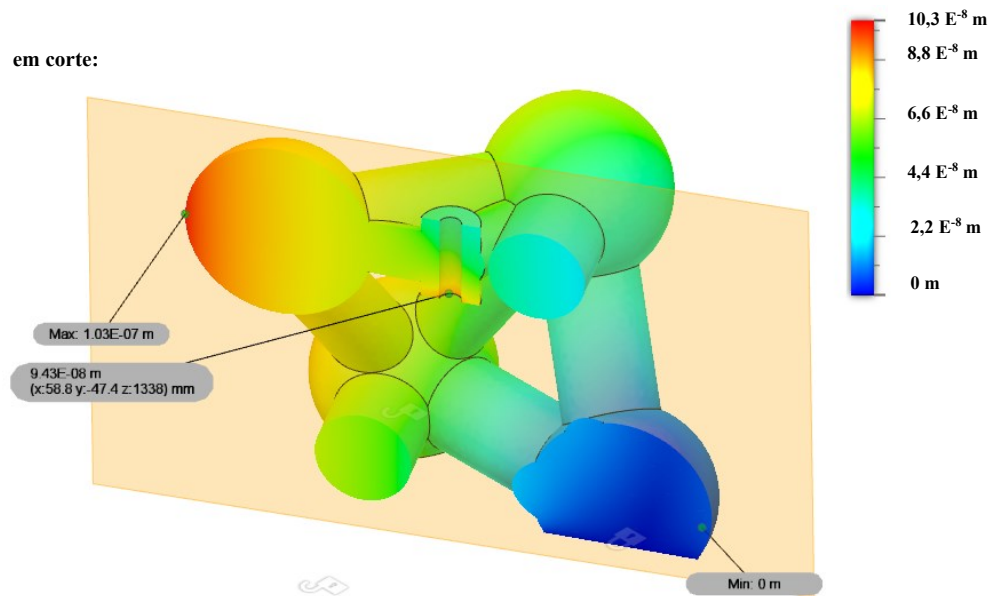
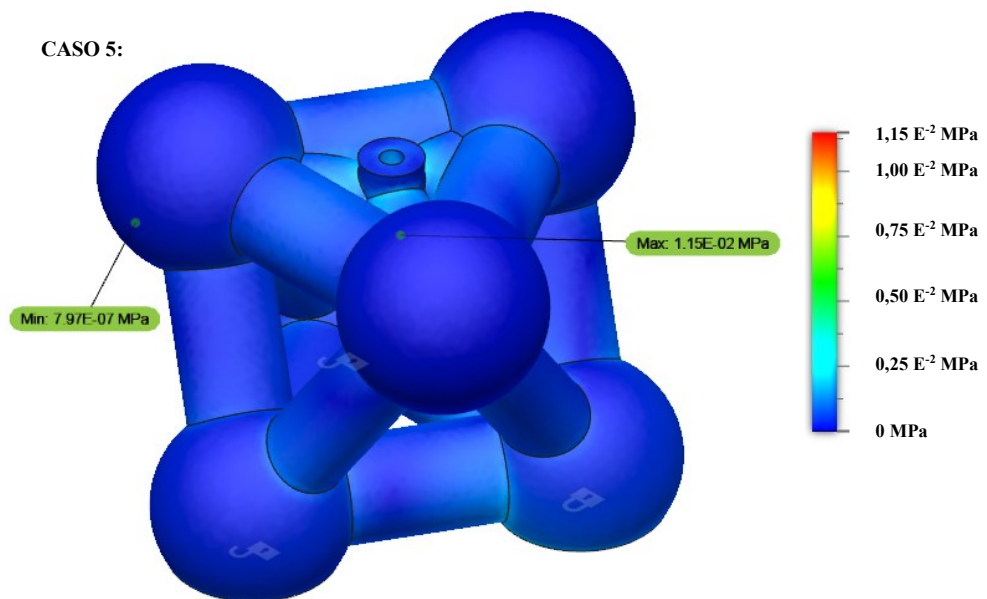


Figura 4.28 – Distribuição de tensão gerada pela aplicação da força de usinagem na estrutura octaédrica (EO).



A deformação máxima considerando a ação da gravidade foi de  $516 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ , como apresentado na Figura 4.29, localizada no cilindro de suporte do SP. O corte apresentado na Figura 4.30, mostra que a deformação no PCE foi de  $515 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ .

As tensões considerando a ação da gravidade são apresentadas na Figura 4.31, alcançando máxima de  $64,6 \text{ E}^{-2} \text{ MPa}$ .



Figura 4.29 – Deformação gerada pela ação da gravidade na estrutura octaédrica (EO).

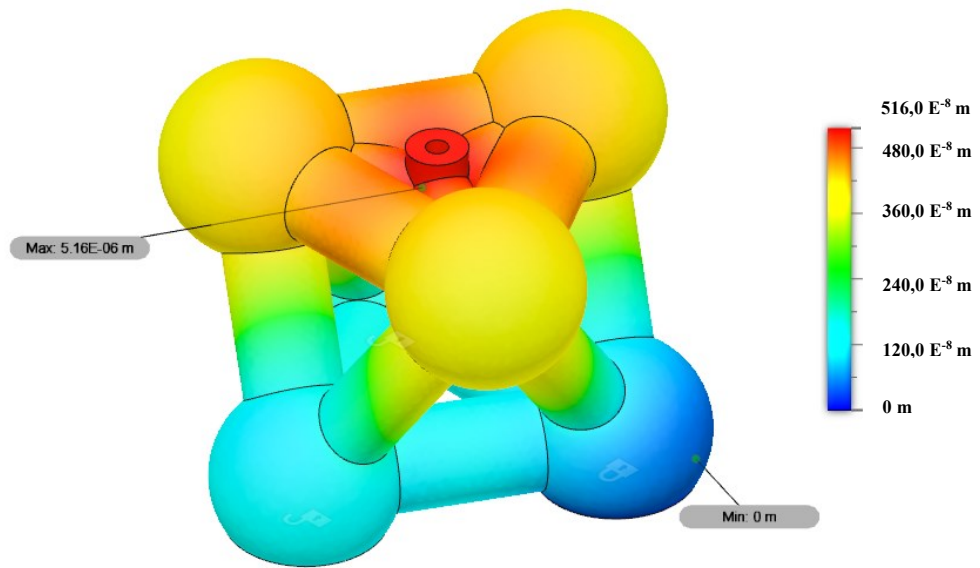


Figura 4.30 – Corte na estrutura octaédrica (EO) para análise de deformação pelo efeito da ação da gravidade.

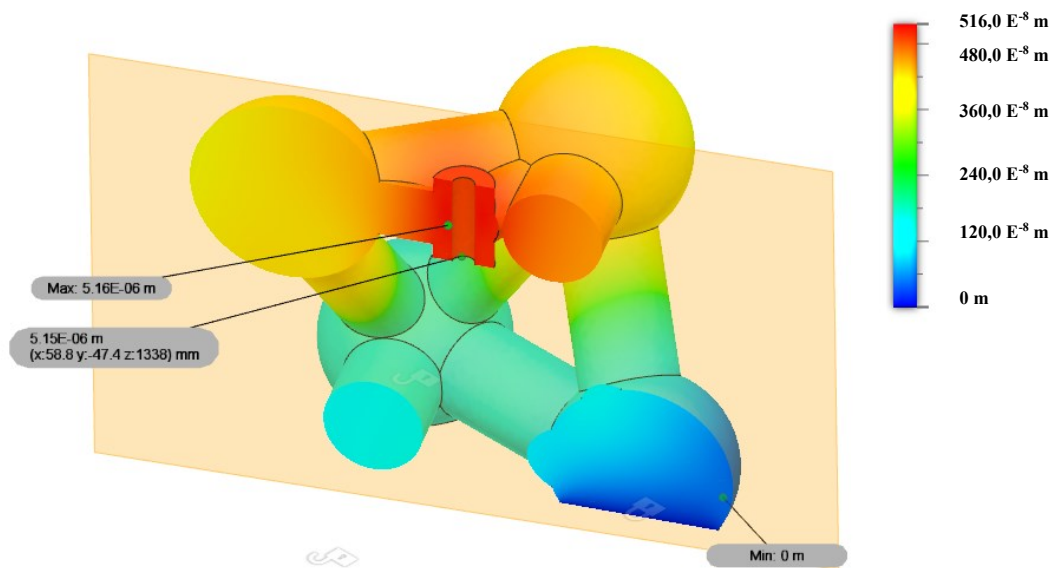
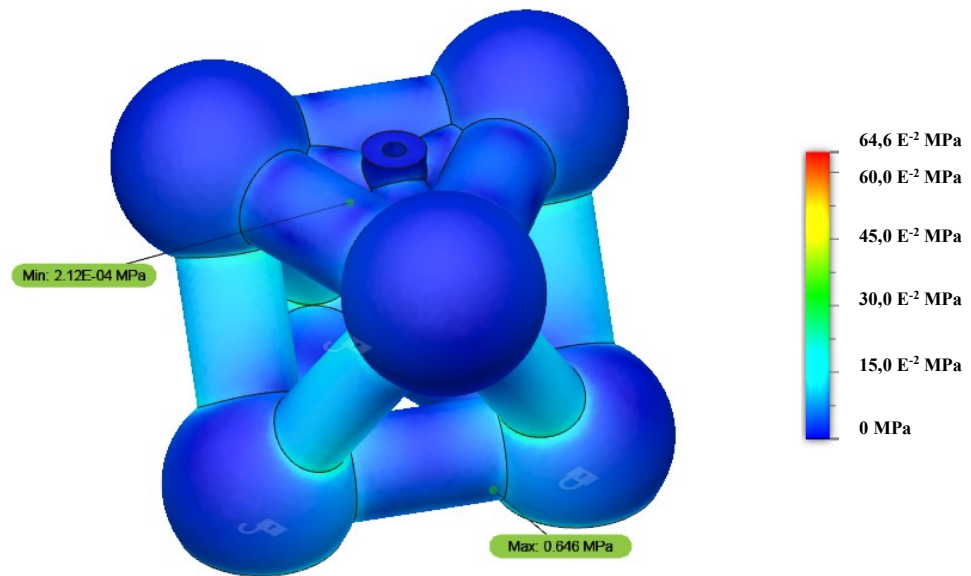


Figura 4.31 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade na estrutura octaédrica (EO).



A deformação máxima obtida na estrutura considerando a ação da gravidade e força de usinagem, simultaneamente, foi de  $517 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ , no cilindro de suporte do SP, como apresentado na Figura 4.32. Segundo o corte da Figura 4.33 a deformação no PCE foi de  $516 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ .

As tensões são ilustradas na Figura 4.34, alcançando máxima de  $64,7 \text{ E}^{-2} \text{ MPa}$ .

Figura 4.32 – Deformação gerada pela ação da gravidade mais a força de usinagem na estrutura octaédrica (EO).

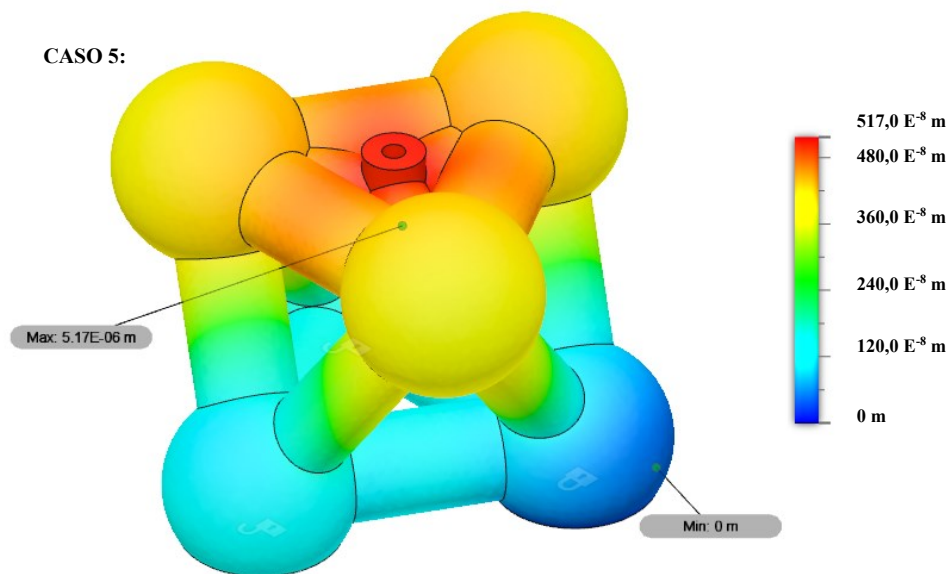


Figura 4.33 – Corte na estrutura octaédrica (EO) para análise de deformação após a ação da gravidade mais a força de usinagem.

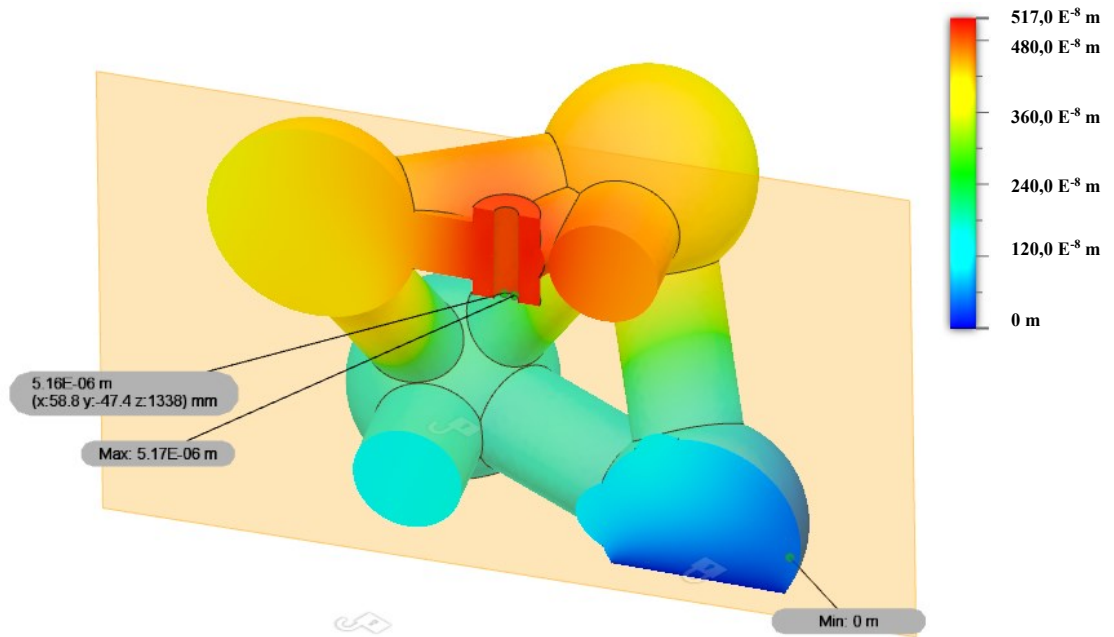
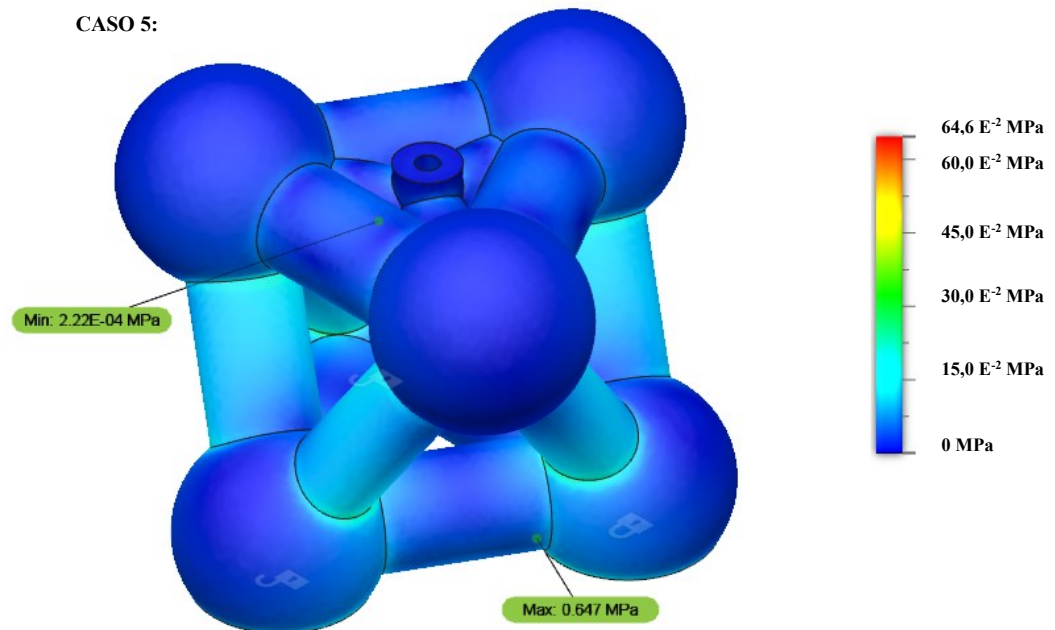


Figura 4.34 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade e aplicação da força de usinagem na estrutura octaédrica (EO).

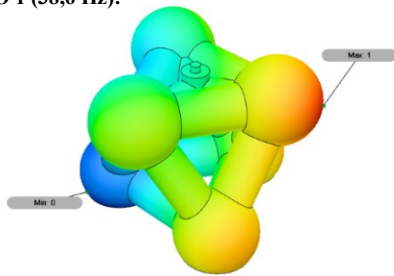


#### 4.4.2 Simulação dinâmica para estrutura octaédrica

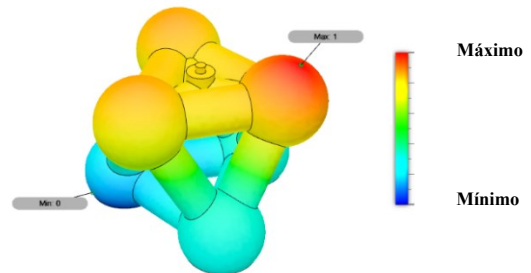
Os modos de vibração da simulação dinâmica da EO são apresentados na Figura 4.35. Eles possuem os respectivos valores de 38,6 Hz, 105 Hz, 120 Hz, 199 Hz, 224 Hz, 252 Hz, 319 Hz e 322 Hz.

Figura 4.35 – Simulação dinâmica com frequências naturais na estrutura octaédrica (EO).

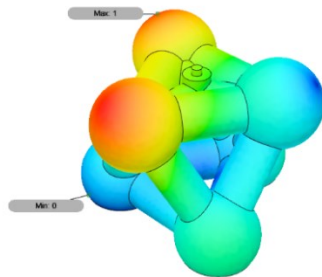
**MODO 1 (38,6 Hz):**



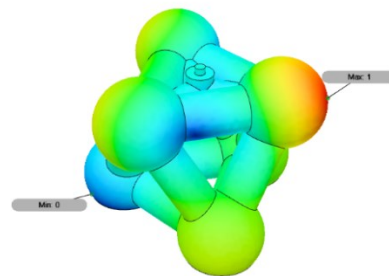
**MODO 2 (105 Hz):**



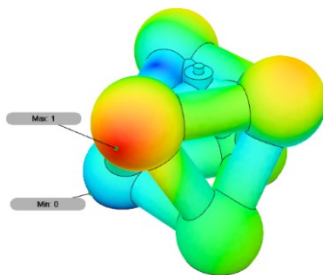
**MODO 3 (120 Hz):**



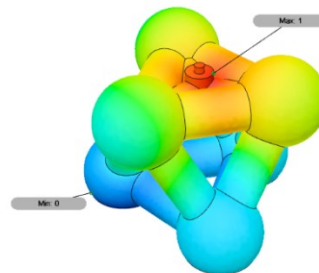
**MODO 4 (199 Hz):**



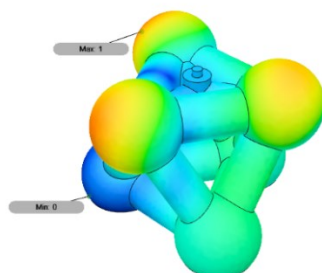
**MODO 5 (224 Hz):**



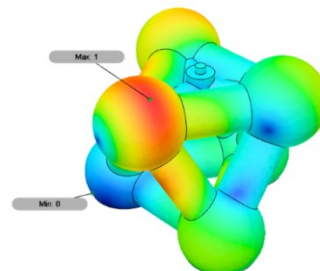
**MODO 6 (252 Hz):**



**MODO 7 (319 Hz):**



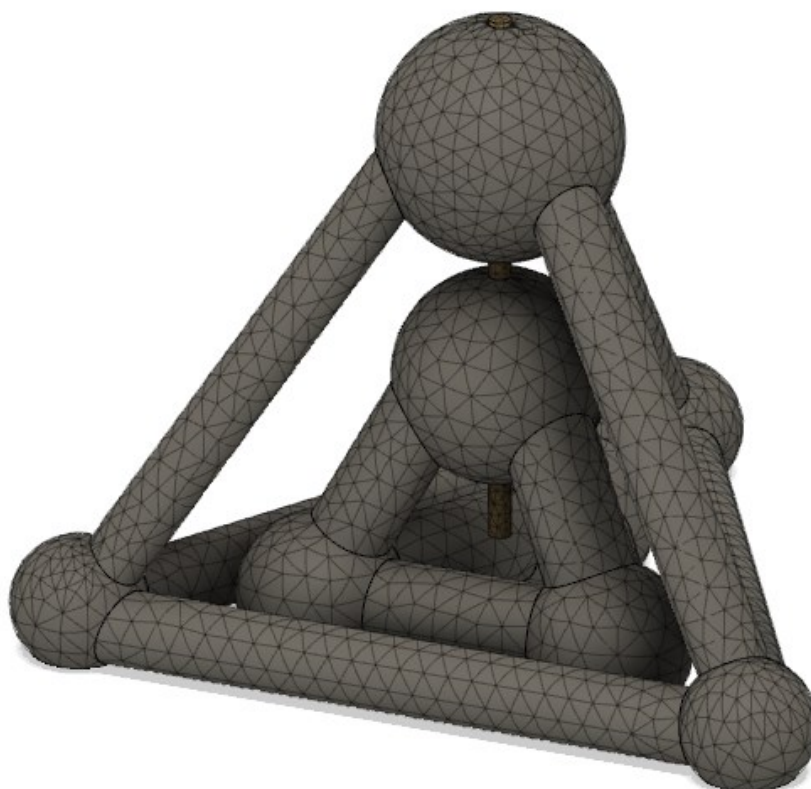
**MODO 8 (322 Hz):**



## 4.5 ESTRUTURA TETRAÉDRICA DUPLA

A simulação da ETD apresentou 112 205 nós e 73 578 elementos representados na Figura 4.36.

Figura 4.36 – Malha gerada para a estrutura tetraédrica dupla (ETD).



### 4.5.1 Simulação estática da estrutura Tetraédrica Dupla

Os valores de deformação encontrados na simulação estática apresentados na Tabela 4.5, sendo o caso crítico, da simulação com a força de usinagem, o caso 4. Para o caso onde as forças de usinagem e da gravidade foram aplicadas simultaneamente, tem-se como resultado o caso 2.

Tabela 4.5 – Deformação estática para estrutura tetraédrica dupla (ETD).

Forças aplicadas na simulação	Deformação a partir da força de usinagem ( $E^{-8}$ m)	Deformação a partir da força da gravidade e de usinagem ( $E^{-8}$ m)
Deformação Caso 1	0,80	529,0
Deformação Caso 2	6,45	531,0
Deformação Caso 3	6,45	529,0
Deformação Caso 4	9,96	529,0
Deformação Caso 5	4,97	530,0

Para possibilitar a visualização das regiões internas da estrutura foi realizado um corte nas imagens apresentadas nas Figura 4.38, 4.41 e 4.44.

Com a análise da Figura 4.37 observou-se que a deformação nesta simulação foi mais intensa na esfera inferior oposta à engastada do tetraedro menor e sua intensidade foi de  $12,8 E^{-8}$  m. A partir do corte apresentado na Figura 4.38 verificou-se que a deformação no PCE foi de  $9,96 E^{-8}$  m.

Figura 4.37 – Deformação após aplicação de força de usinagem na estrutura tetraédrica dupla (ETD).

CASO 4:

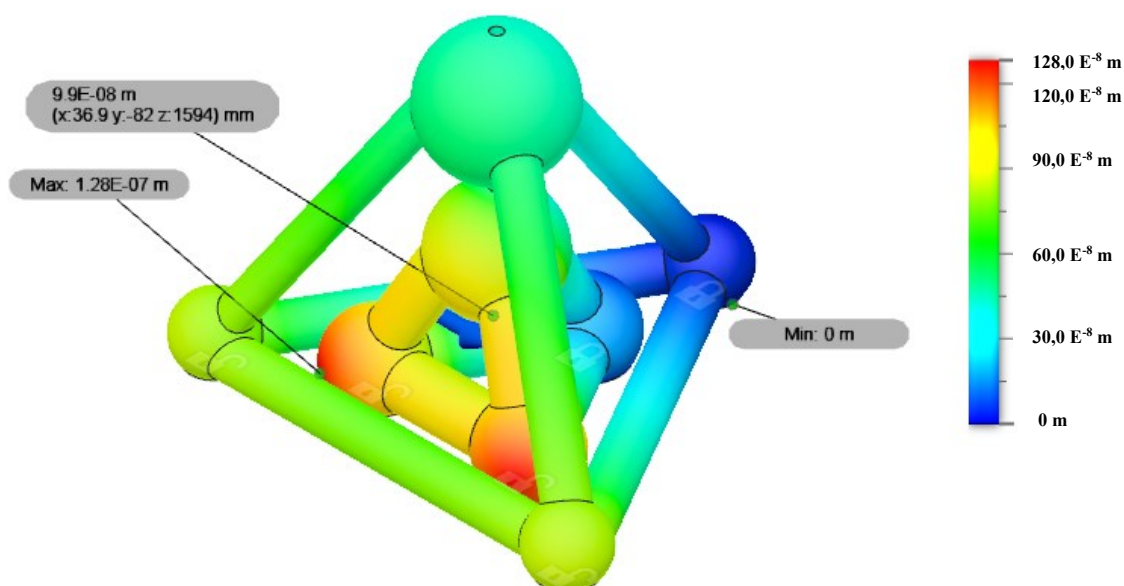
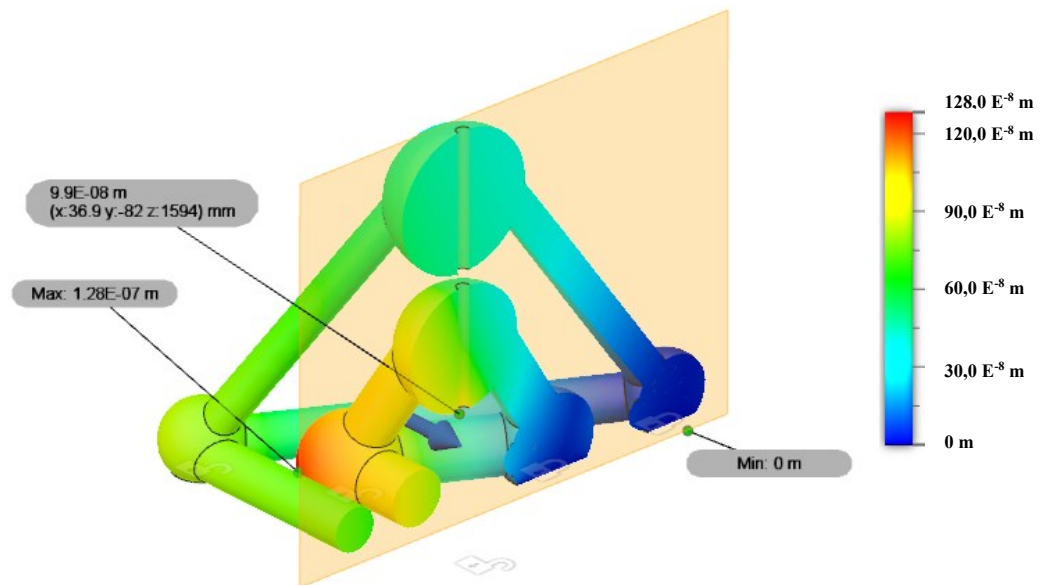


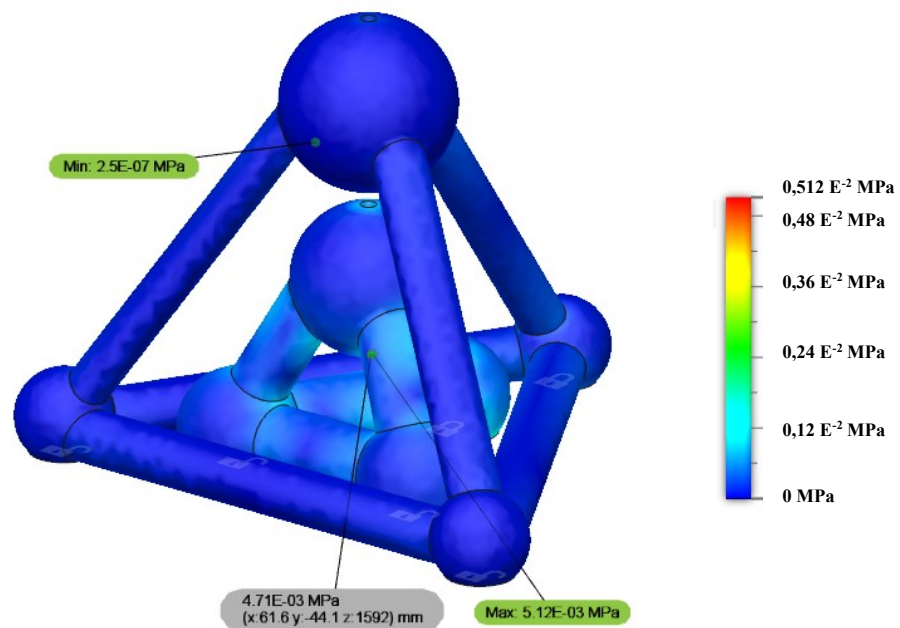
Figura 4.38 – Corte na estrutura tetraédrica dupla (ETD) para análise de deformação após aplicação da força de usinagem.



Com relação as tensões geradas pela aplicação da força estática, apresentada na Figura 4.39, observou-se que a tensão máxima foi de  $0,512 \text{ E}^{-2} \text{ MPa}$ .

Figura 4.39 – Distribuição de tensão gerada pela aplicação da força de usinagem na estrutura tetraédrica dupla (ETD).

CASO 4:



A deformação máxima considerando a ação da gravidade, apresentada na Figura 4.40, localiza-se no cilindro inferior do tetraedro maior que une as duas esferas com movimentação limitada no eixo Z, com intensidade de  $4\,040\,E^{-8}\text{ m}$ . Enquanto no PCE a deformação foi de  $530\,E^{-8}\text{ m}$ , como apresentado na Figura 4.41.

Figura 4.40 – Deformação gerada pela ação da gravidade na estrutura tetraédrica dupla (ETD).

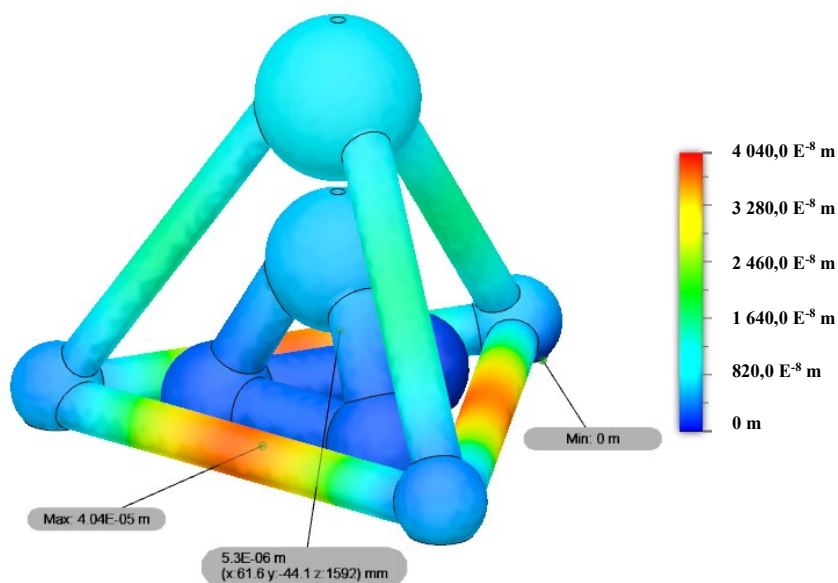
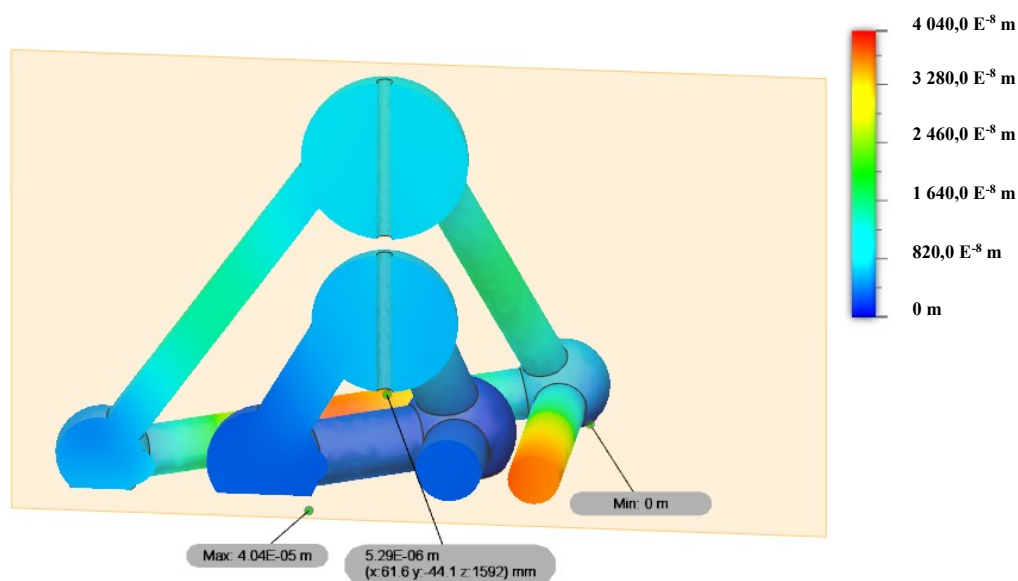


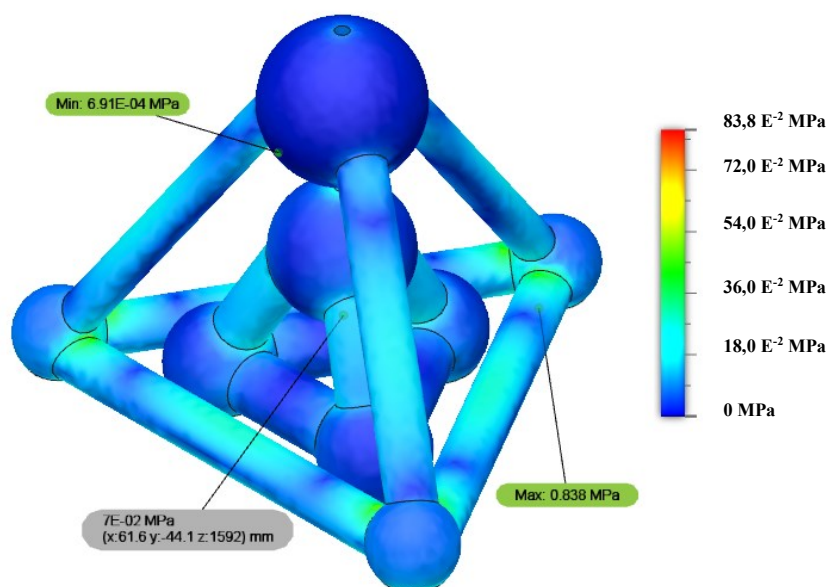
Figura 4.41 – Corte na estrutura tetraédrica dupla (ETD) para análise de deformação após a ação da gravidade.





As tensões considerando a ação da gravidade são apresentadas na Figura 4.42, alcançando máxima de  $0,668 \text{ E}^{-2} \text{ MPa}$ .

Figura 4.42 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade na estrutura tetraédrica dupla (ETD).



A deformação máxima obtida na estrutura considerando a ação simultânea da gravidade e da força de usinagem, foi de  $4\,040 \text{ E}^{-8} \text{ m}$  no cilindro do tetraedro maior que une as esferas inferiores, oposto a esfera engastada, como apresentado na Figura 4.43. No PCE a deformação foi de  $531 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ , como apresentado na Figura 4.44.

Figura 4.43 – Deformação gerada pela ação da gravidade mais a força de usinagem na estrutura tetraédrica dupla (ETD).

CASO 2:

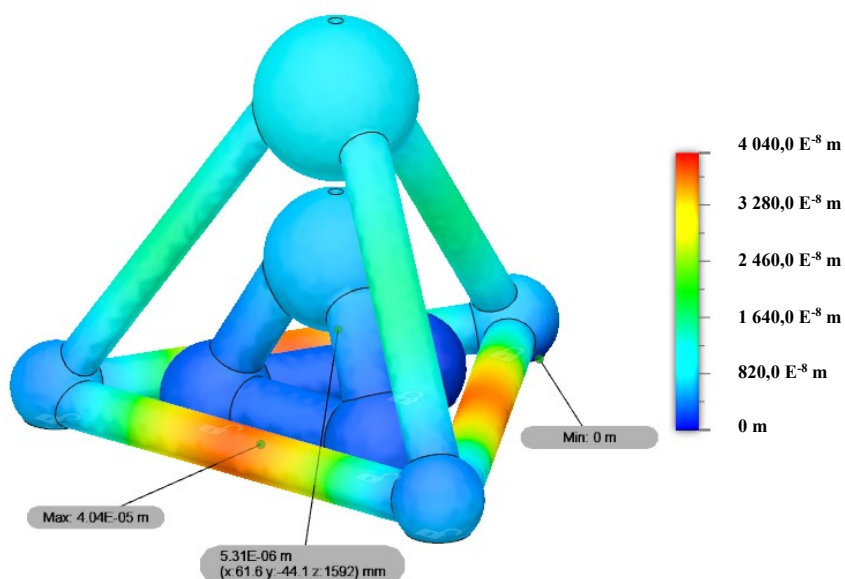
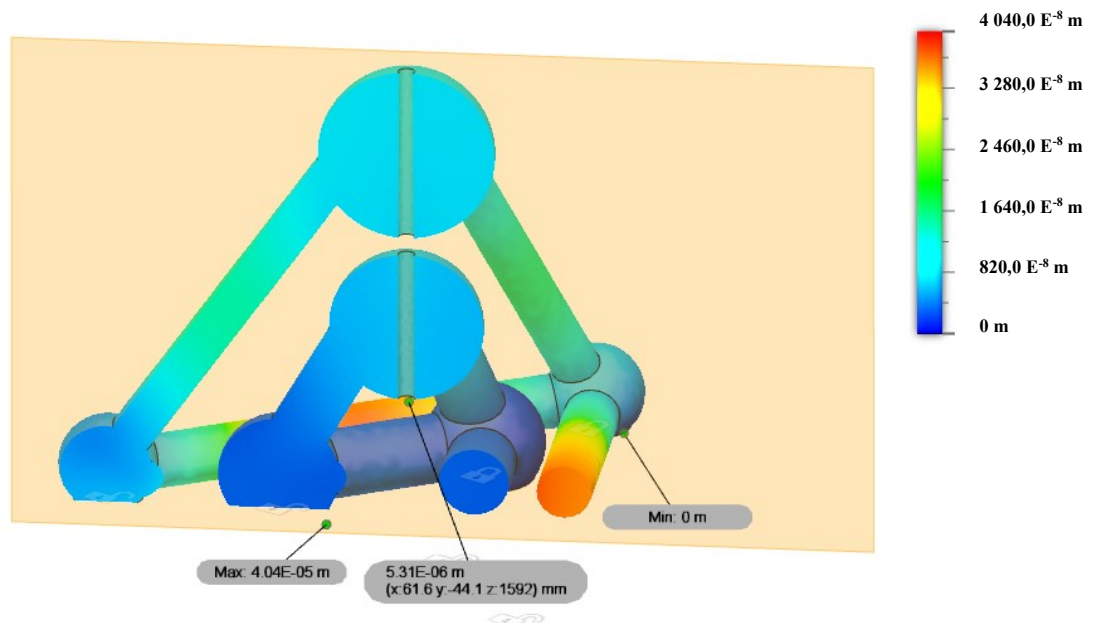
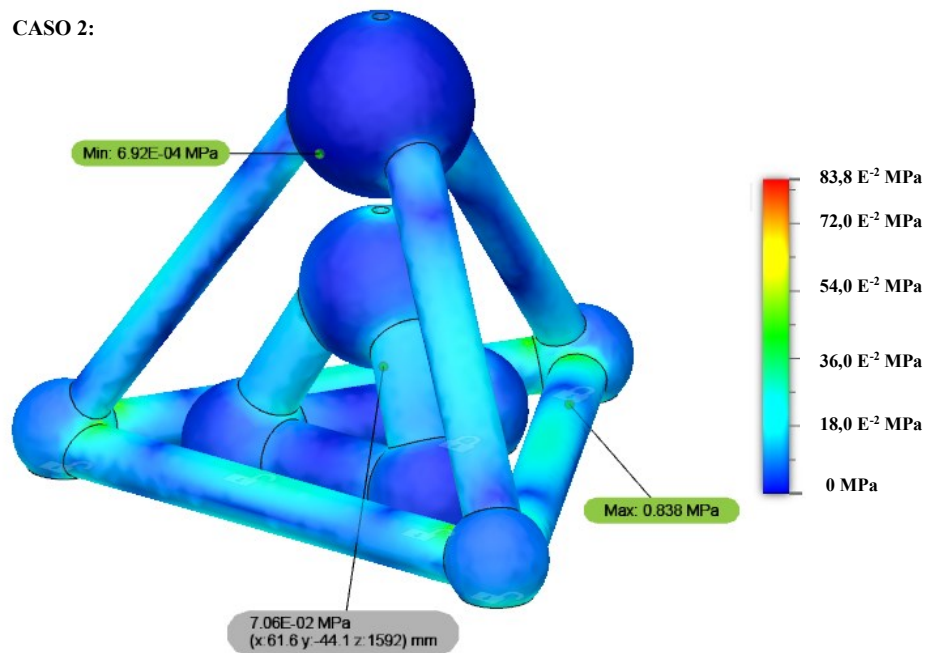


Figura 4.44 – Corte na estrutura tetraédrica dupla (ETD) para análise de deformação após a ação da gravidade mais a força de usinagem.



As tensões são ilustradas na Figura 4.45, alcançando máxima de  $83,8 \text{ E}^{-2} \text{ MPa}$ .

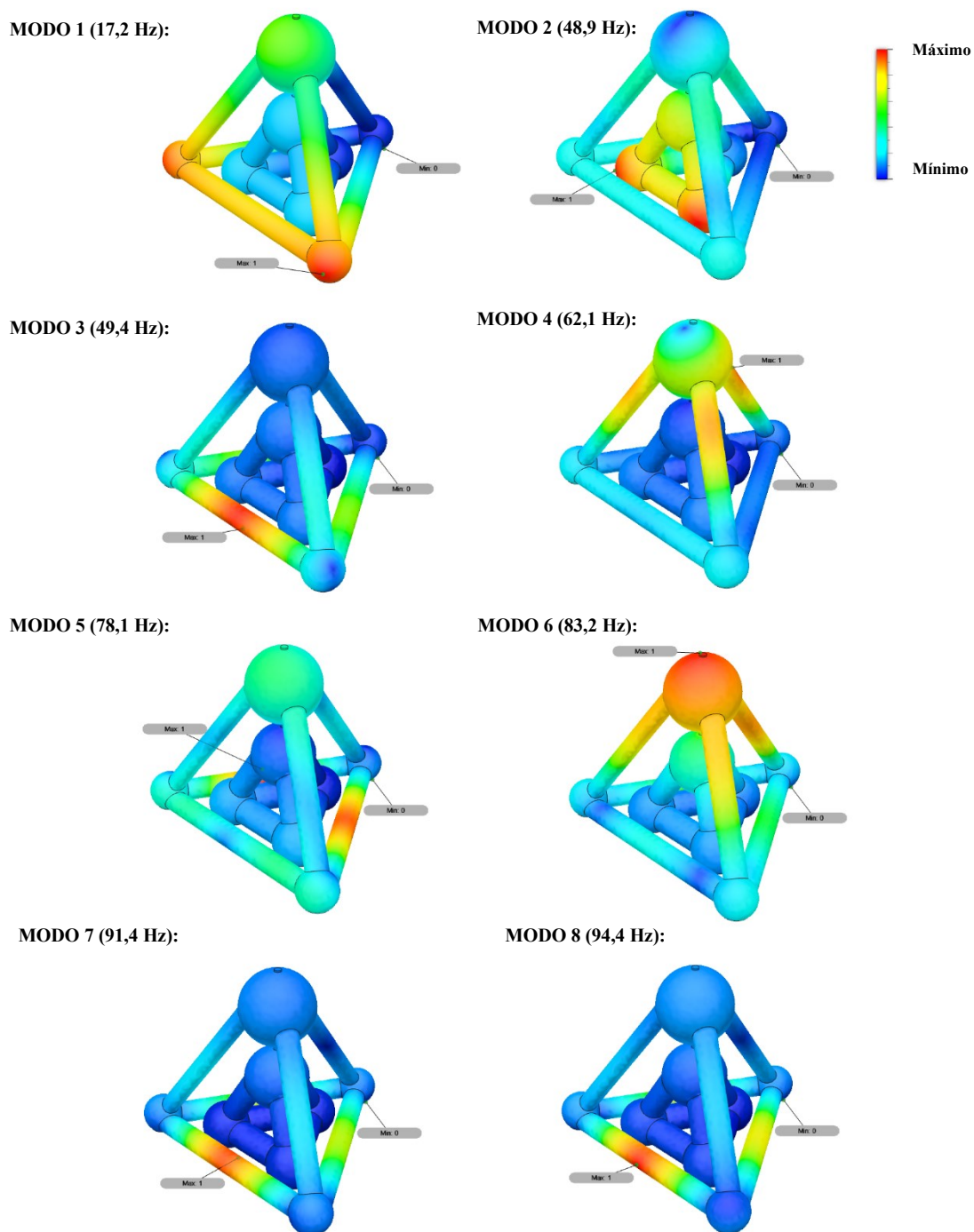
Figura 4.45 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade e aplicação da força de usinagem na estrutura tetraédrica dupla (ETD).



#### 4.5.2 Simulação dinâmica da estrutura tetraédrica dupla.

Os modos de vibração da simulação dinâmica da ETD são apresentados na Figura 4.46. Eles possuem os respectivos valores de 17,2 Hz, 48,9 Hz, 49,4 Hz, 62,1 Hz, 78,1 Hz, 83,2 Hz, 91,4 Hz e 94,4 Hz.

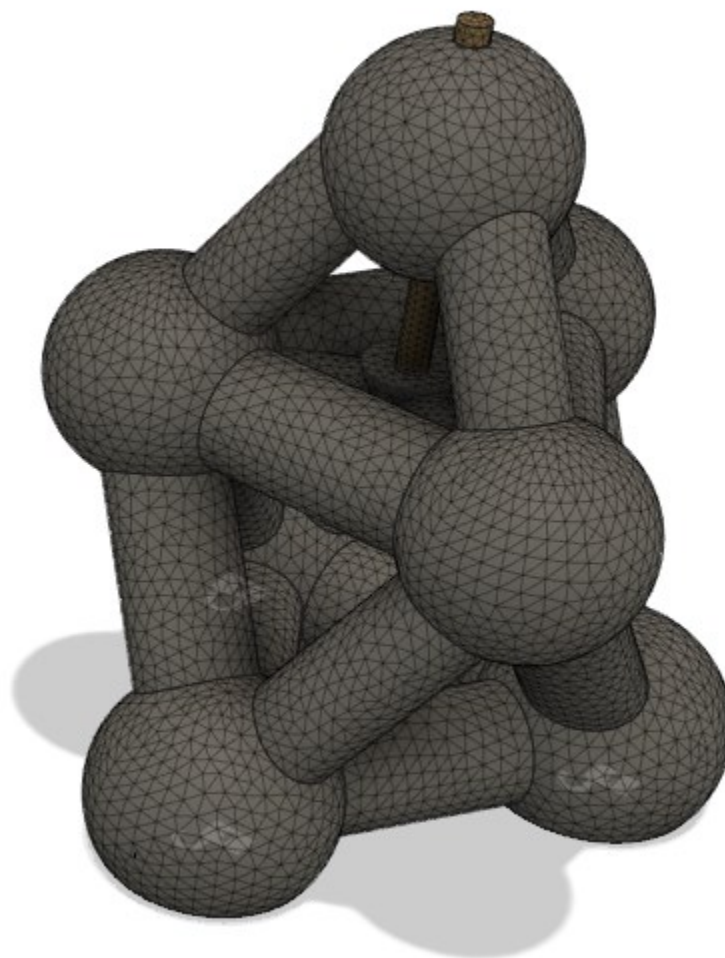
Figura 4.46 – Simulação dinâmica com frequências naturais na estrutura tetraédrica dupla (ETD).



## 4.6 ESTRUTURA OCTRAÉDRICA MAIS TETRAÉDRICA

As simulações na EOT utilizaram 209 770 nós e 141 462 elementos, assim como apresentado na Figura 4.47.

Figura 4.47 – Malha gerada para estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).



### 4.6.1 Simulação estática para estrutura octaédrica mais tetraédrica

Os valores de deformação relativos à simulação estática são apresentados na Tabela 4.6, sendo o caso crítico, da simulação com força de usinagem, o caso 5. Para o caso onde as forças de usinagem mais a ação da gravidade estão aplicadas simultaneamente, o caso crítico foi o caso 2.

Tabela 4.6 – Deformação estática para estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).

Forças aplicadas na simulação	Deformação a partir da força de usinagem ( $E^{-8}$ m)	Deformação a partir da força da gravidade e de usinagem ( $E^{-8}$ m)
Deformação Caso 1	1,40	645,0
Deformação Caso 2	8,20	648,0
Deformação Caso 3	8,20	645,0
Deformação Caso 4	7,10	646,0
Deformação Caso 5	9,31	645,0

Para possibilitar a visualização das regiões internas da estrutura foi realizado um corte nas imagens apresentadas nas Figuras 4.49, 4.52 e 4.55.

A partir da análise da Figura 4.48 observou-se que as deformações foram mais intensas na esfera superior oposta à esfera engastada nos três eixos do octaedro, e seu máximo foi de  $11,0 E^{-8}$  m. A deformação no PCE foi de  $9,3 E^{-8}$  m, como apresentado na Figura 4.49.

Figura 4.48 – Deformação após aplicação de força estática na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).

CASO 5:

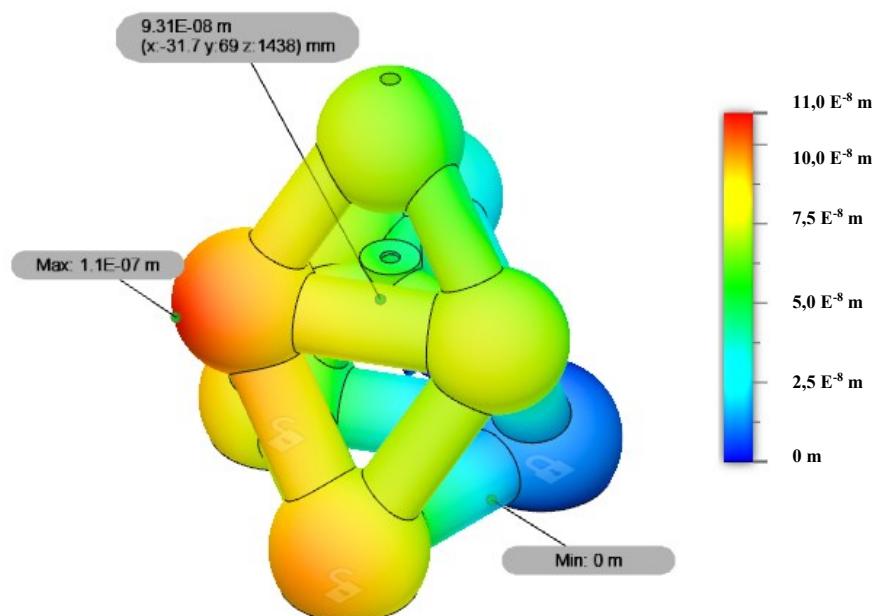
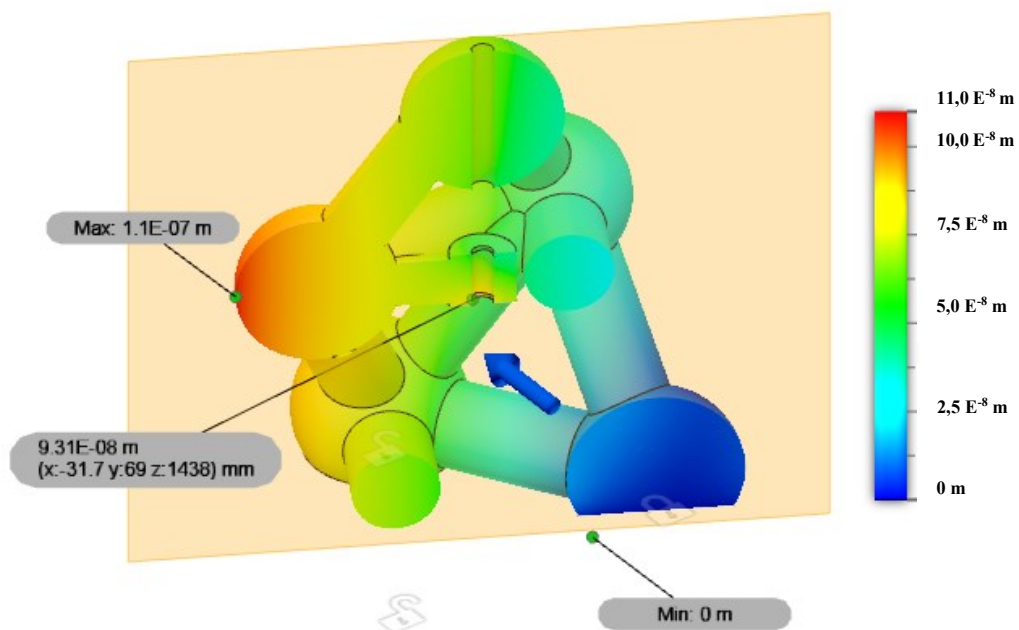
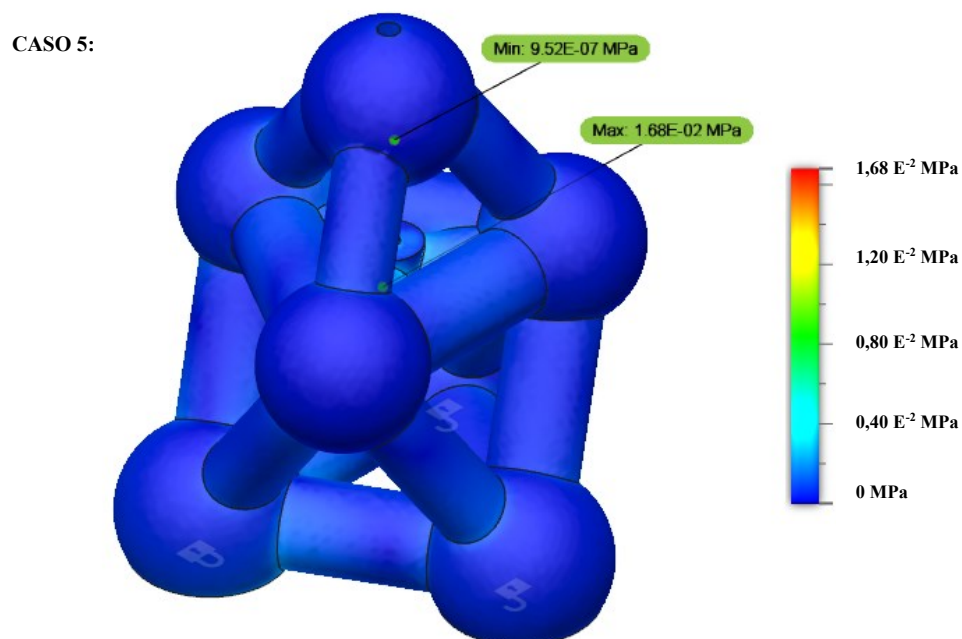


Figura 4.49 – Corte na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT) para análise de deformação após aplicação de força de usinagem.



Com relação as tensões geradas pela aplicação da força estática, apresentadas na Figura 4.50, observou-se que a tensão máxima encontrada na estrutura foi de 1,88 E<sup>-2</sup> MPa.

Figura 4.50 – Distribuição de tensão gerada pela aplicação da força estática na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).



A deformação máxima considerando a ação da gravidade foi de  $652 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ , como apresentado na Figura 4.51, localizada na esfera superior do tetraedro. Para o PCE apresentado na Figura 4.52 a deformação foi de  $646 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ .

Figura 4.51 – Deformação gerada pela ação da gravidade na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).

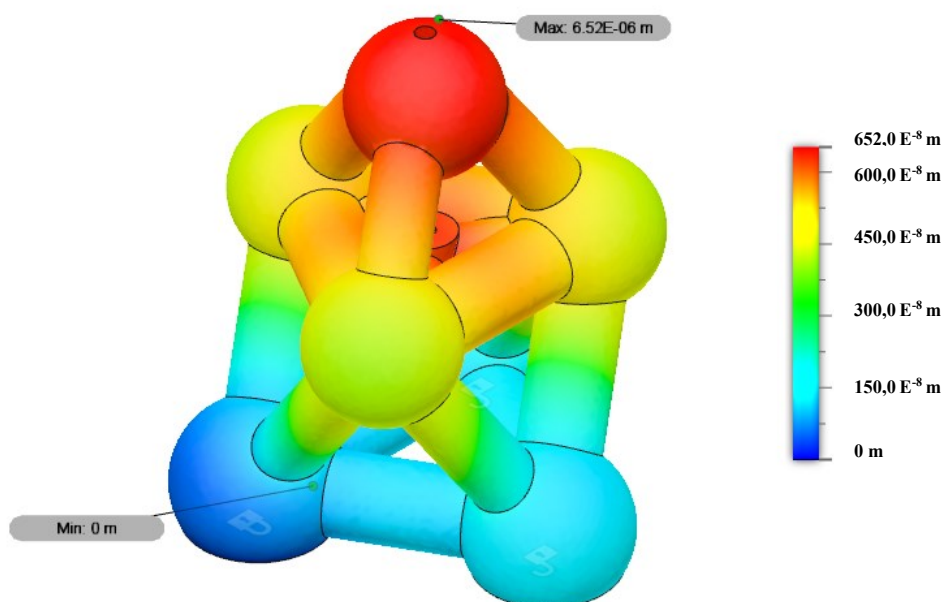
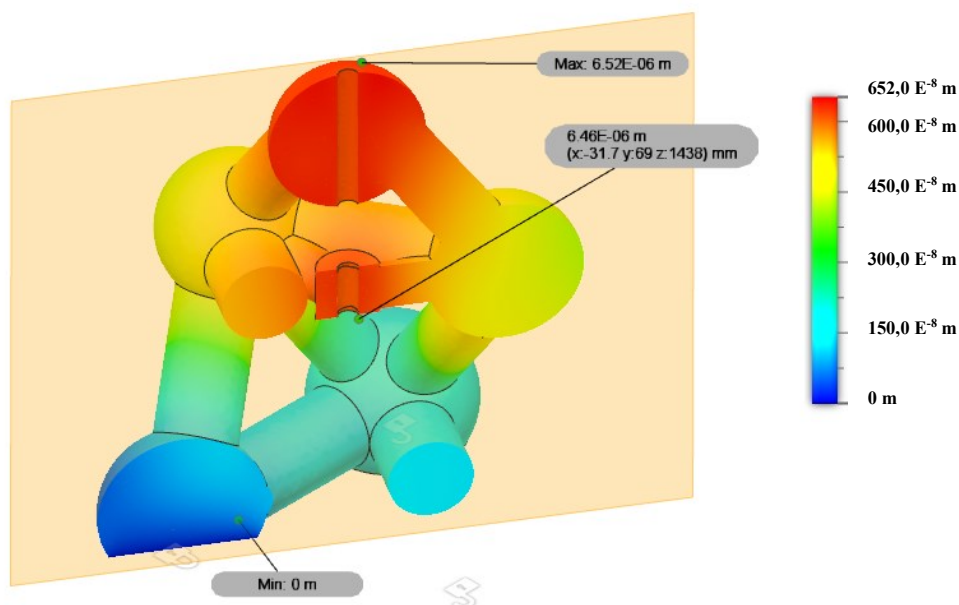
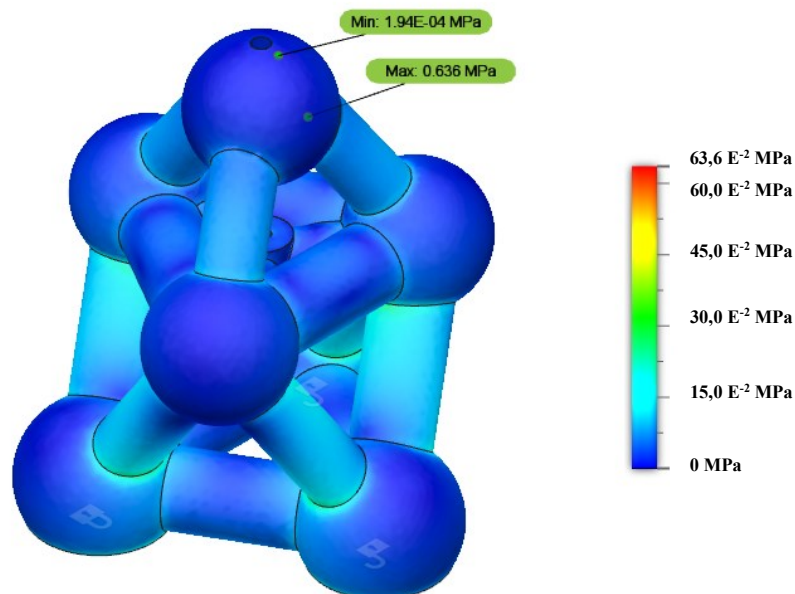


Figura 4.52 – Corte na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT) para análise de deformação após a ação da gravidade.



As tensões calculadas na simulação são apresentadas na Figura 4.53, alcançando máxima de  $63,6 \text{ E}^{-2} \text{ MPa}$ .

Figura 4.53 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).



A deformação máxima obtida considerando a ação simultânea da gravidade e da força de usinagem, foi de  $653 \text{ E}^{-8} \text{ m}$  localizada no topo da esfera superior do tetraedro, como apresentado na Figura 4.54. O PCE, apresentado na Figura 4.55, teve uma deformação de  $648 \text{ E}^{-8} \text{ m}$ .

As tensões são ilustradas na Figura 4.56, alcançando máxima de 638 MPa.

Figura 4.54 – Deformação gerada pela ação da gravidade e da força de usinagem na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).

CASO 2:

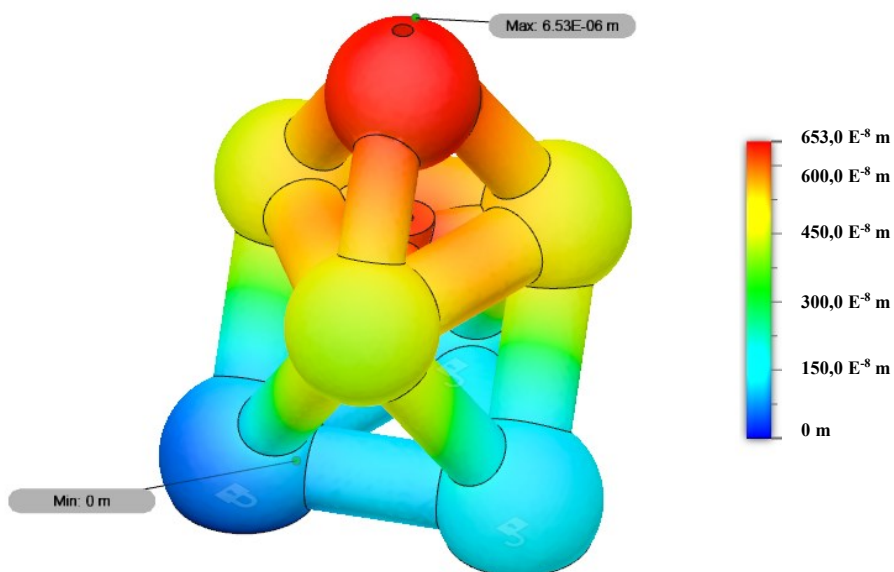




Figura 4.55 – Corte na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT) para análise de deformação após aplicação de força de usinagem mais a ação da gravidade.

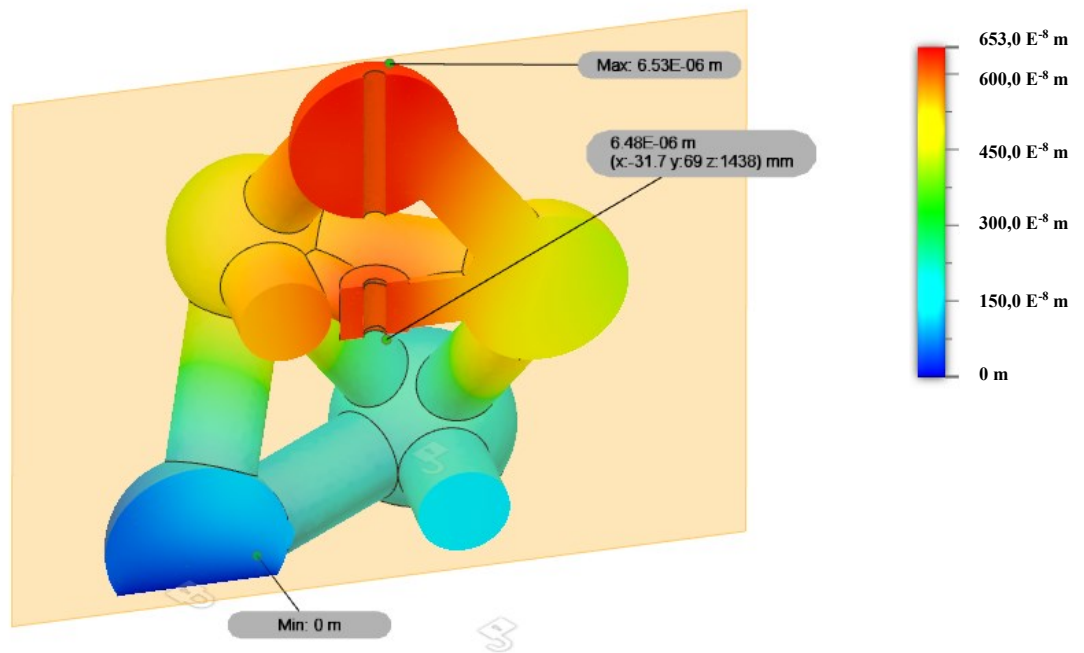
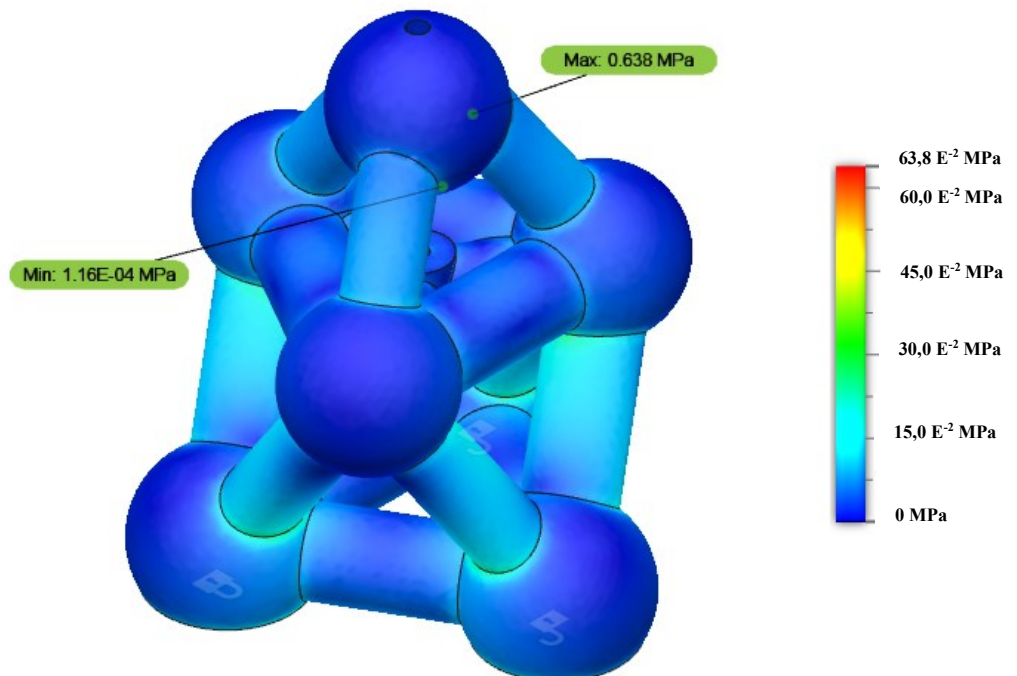


Figura 4.56 – Distribuição de tensão gerada pela ação da gravidade e aplicação da força de usinagem na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).

CASO 2:

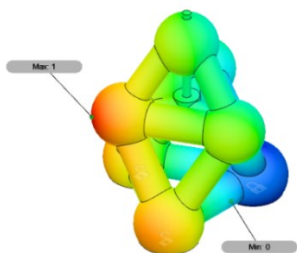


#### 4.6.2 Simulação dinâmica da estrutura octaédrica mais tetraédrica

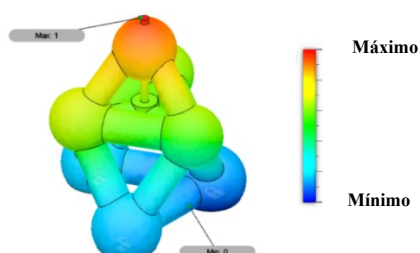
Os modos de vibração da simulação dinâmica da EOT são apresentados na Figura 4.57. Eles possuem os respectivos valores de 38 Hz, 89,7 Hz, 104 Hz, 180 Hz, 213 Hz, 221 Hz, 300 Hz e 318 Hz.

Figura 4.57 – Simulação dinâmica com frequências naturais na estrutura octaédrica mais tetraédrica (EOT).

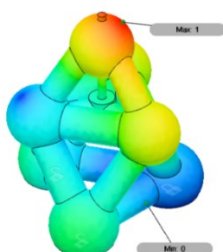
**MODO 1 (38 Hz):**



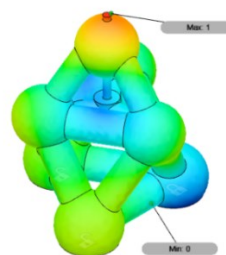
**MODO 2 (89,7 Hz):**



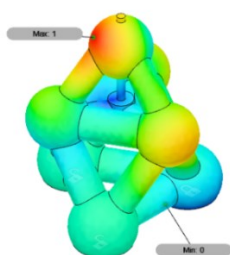
**MODO 3 (104 Hz):**



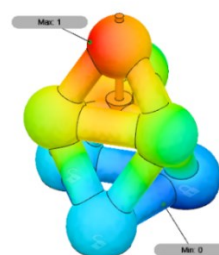
**MODO 4 (180 Hz):**



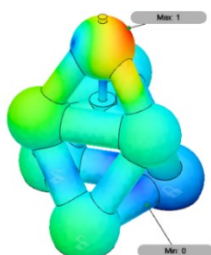
**MODO 5 (213 Hz):**



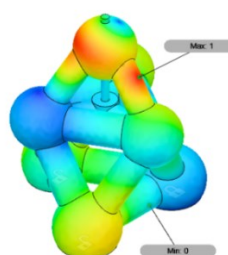
**MODO 6 (221 Hz):**



**MODO 7 (300 Hz):**



**MODO 8 (318 Hz):**



#### 4.7 COMPARAÇÃO DAS ESTRUTURAS

As estruturas apresentaram características distintas não apenas na geometria, mas também na fixação do SP, engastamentos e malha. As particularidades de cada geometria resultaram em diferentes deformações no PCE, deformações máximas, tensões, modos de vibração, massa, volume e dificuldade de fabricação. Deste modo, neste capítulo os resultados de cada estrutura são comparados e discutidos.

Nas estruturas EOT e ETD, as quais são compostas pela união de duas geometrias, apenas uma das geometrias limitou o volume de trabalho. Para o caso da ETD a geometria que limitou a movimentação de seus eixos é o tetraedro interno. Já para o caso da EOT, a geometria limitante é o octaedro também interno à estrutura. Outra característica presente nestas duas estruturas é que estas apresentaram duas regiões de apoio para o SP, enquanto as demais apresentaram apenas uma.

A comparação dos resultados de deformação estática mediante as três condições de contorno apresentados na Tabela 4.7 revelou que os valores correspondem a resultante vetorial do deslocamento e dependem da intensidade, direção e sentido das forças internas e externas. Sendo assim, os valores obtidos nas simulações das deformações contendo a força de usinagem e gravidade, simultaneamente, trataram da soma vetorial da deformação pela ação da gravidade com a deformação pelo efeito da força de usinagem de magnitude de 100 N definida em projeto.

Tabela 4.7 – Deformações obtidas no ponto crítico das estruturas (PCE) na simulação estática.

Deformação	Em C (EC)	Pórtico (EP)	Tetraédrica (ET)	Octaédrica (EO)	Tetraédrica dupla (ETD)	Octaédrica mais tetraédrica (EOT)
<b>Simulação com a força de usinagem (<math>E^{-8}</math> m)</b>	10,2	9,9	9,8	9,4	9,9	9,3
<b>Simulação com a ação da gravidade (<math>E^{-8}</math> m)</b>	11,5	34,4	239,0	515,0	529,0	646,0
<b>Simulação com a ação da gravidade e da força de usinagem (<math>E^{-8}</math> m)</b>	15,5	39,3	241,0	517,0	531,0	648,0

A geometria que apresentou maior deformação no PCE por ação da gravidade foi a EOT, seguida da ETD e a EO. Estas estruturas também apresentaram as maiores deformações pela ação da gravidade e força de usinagem.

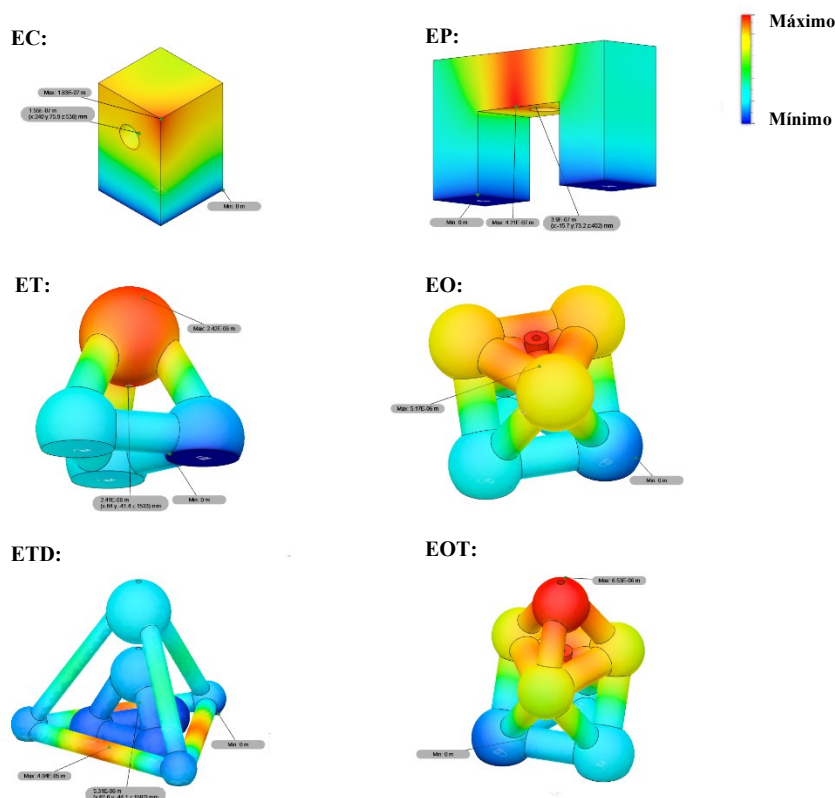
As estruturas que mais se destacaram com as menores deformações no PCE por ação da gravidade foram a EC e EP, respectivamente. Resultado similar foi encontrado ao analisar a simulação com os esforços aplicados simultaneamente.

O ponto de máxima deformação, por ação da gravidade isoladamente e com a força de usinagem isoladamente, em nenhuma das estruturas se encontra na mesma região.

A comparação dos resultados obtidos na simulação com a ação da gravidade e a força de usinagem aplicadas simultaneamente apontou que apenas duas estruturas tiveram ponto de máxima deformação na mesma região da máxima deformação da simulação contendo apenas a força de usinagem, sendo a EC e a EP. As demais estruturas apresentaram ponto de máxima deformação próximo a região obtida na simulação considerando apenas a ação da gravidade.

Comparando as simulações de deformação pela ação da gravidade, a estrutura ETD, diferentemente das demais, possui deformações predominantes na região inferior, próxima à base do tetraedro, e não na região superior próxima do SP. Resultado similar foi encontrado para a simulação contendo a força de usinagem e a ação da gravidade, simultaneamente, como apresentado na Figura 4.58.

Figura 4.58 – Deformações por ação simultânea da gravidade e força de usinagem nas estruturas analisadas.



A partir das análises das Tabela 4.7 e 4.8 verificou-se que as deformações considerando a ação da gravidade isolada e as deformações considerando a ação da gravidade e força de usinagem simultaneamente apresentaram valores próximos. A única exceção para esta observação é a EC. Deste modo, verificou-se que o efeito da gravidade sobre as estruturas foi predominante à força de usinagem quanto as deformações.

A deformação máxima de cada estrutura, apresentada na Tabela 4.8, diferente do que ocorreu na simulação da deformação no PCE, apresentada na Tabela 4.7, apontou os maiores valores de deformação na ETD e não na EOT. Isso se dá pela diferença de massa e rigidez destas estruturas.

Com exceção da estrutura ETD, as deformações máximas encontradas nas demais estruturas foram próximas a deformação obtida no PCE.

Tabela 4.8 – Deformações estáticas máximas nas estruturas analisadas considerando os requisitos de projeto do capítulo 3.2.1, página 53.

Deformação	Em C	Pórtico	Tetraédrica	Octaédrica	Tetraédrica dupla	Octaédrica mais tetraédrica
<b>Simulação com a força de usinagem (<math>E^{-8}</math> m)</b>	11,60	11,30	9,98	10,30	12,80	9,31
<b>Simulação com a ação da gravidade (<math>E^{-8}</math> m)</b>	12,90	35,50	241,00	516,00	4 040,00	652,00
<b>Simulação com a ação da gravidade e da força de usinagem (<math>E^{-8}</math> m)</b>	18,30	42,10	242,00	517,00	4 040,00	653,00

Considerando um fator de segurança de 3, critério de Von Mises e a tensão de escoamento do granito sintético de 10 MPa, a máxima tensão admissível nas estruturas foi de 3,33 MPa. A análise dos resultados na Tabela 4.9 indica que as tensões mecânicas não ultrapassaram a tensão máxima admissível em projeto de 3,33 MPa em nenhuma das estruturas avaliadas, segundo os critérios de projeto detalhados no capítulo 3.2.1, página 53. Dessa forma, foram propostas geometrias básicas (sem detalhamentos e otimizações de projeto) e suas respectivas dimensões gerais que atenderam aos critérios de projeto e servem de ponto de partida para desenvolvimentos futuros.

Considerando os projetos mecânicos individuais e as etapas subsequentes de fabricação e montagem de cada estruturas, tem-se os seguintes entendimentos no que tange o direcionamento para continuação desta pesquisa e aplicação tecnológica.

Embora as maiores deformações encontradas nas simulações sejam provenientes das ações simultâneas da gravidade e da força de usinagem, as deformações causadas pela força peso na estrutura devem ser consideradas para nortear a geometria e tolerâncias geométricas do projeto. Assim, cada molde/projeto estrutural de granito sintético deve sustentar a cura da estrutura de modo a garantir as tolerâncias dimensionais e principalmente geométricas considerando as deformações por ação da gravidade. As correções dimensionais e geométricas podem, então, ser realizadas em etapas seguintes envolvendo processos de usinagem (considerados de maior custo e dependentes de máquinas-ferramentas) e/ou etapas de montagem e alinhamento de subconjuntos (inspeção e ajuste metrológico).

Tabela 4.9 – Tensões máximas obtidas pelo critério de Von Mises na estrutura por meio da simulação estática.

Tensão	Em C (EC)	Pórtico (EP)	Tetraédrica (ET)	Octaédrica (EO)	Tetraédrica dupla (ETD)	Octaédrica mais tetraédrica (EOT)
<b>Simulação com a força de usinagem (MPa)</b>	0,0244	0,0197	0,0650	0,0115	0,0051	0,0168
<b>Simulação com a ação da gravidade (MPa)</b>	0,0283	0,0421	2,8000	0,6460	0,8380	0,6360
<b>Simulação com a ação da gravidade e da força de usinagem (MPa)</b>	0,0333	0,0477	2,8100	0,6470	0,8380	0,6380

Quanto aos modos de vibração da estrutura, quando em uso as forças internas e externas não devem excitar a estrutura nas faixas identificadas na Tabela 4.10 a fim de evitar ressonância mecânica que compromete o desempenho global das máquinas e processos de remoção.

Isto posto, a partir dos resultados dinâmicos apresentados na Tabela 4.10, verificou-se que dentre as estruturas, aquela que possui o maior valor do primeiro modo de vibração foi a EC, seguida da EP. As demais estruturas apresentaram o primeiro modo de vibração abaixo de 100 Hz, sendo a menor frequência natural encontrada na ETD.

A partir das análises da Tabela 4.10 e da Tabela 4.11 verificou-se que a massa é inversamente proporcional aos modos de vibração.

Tabela 4.10 – Modos de vibração (Hz) das estruturas.

	<b>Modo 1 (Hz)</b>	<b>Modo 2 (Hz)</b>	<b>Modo 3 (Hz)</b>	<b>Modo 4 (Hz)</b>	<b>Modo 5 (Hz)</b>	<b>Modo 6 (Hz)</b>	<b>Modo 7 (Hz)</b>	<b>Modo 8 (Hz)</b>
<b>C (EC)</b>	530,0	532,0	919,0	1 555,0	1 696,0	1 742,0	2 782,0	3 156,0
<b>Pórtico (EP)</b>	342,0	455,0	541,0	975,0	1 063,0	1 323,0	1 445,0	1 637,0
<b>Tetraédrica (ET)</b>	57,3	166,0	195,0	284,0	299,0	345,0	373,0	396,0
<b>Octaédrica (EO)</b>	38,6	105,0	120,0	199,0	224,0	252,0	319,0	322,0
<b>Tetraédrica dupla (ETD)</b>	17,2	48,9	49,4	62,1	78,1	83,2	91,4	94,4
<b>Octaédrica mais tetraédrica (EOT)</b>	38,0	89,7	104,0	180,0	213,0	221,0	300,0	318,0

Parâmetros como massa, volume ocupado e complexidade de fabricação das estruturas são mostrados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Comparação mássica, volumétrica e dificuldade de fabricação das estruturas.

<b>Tensão</b>	<b>Em C (EC)</b>	<b>Pórtico (EP)</b>	<b>Tetraédrica (ET)</b>	<b>Octaédrica (EO)</b>	<b>Octaédrica mais tetraédrica (EOT)</b>	<b>Tetraédrica dupla (ETD)</b>
<b>Massa da estrutura (Kg)</b>	359	432	8 740	20 600	19 200	27 000
<b>Volume ocupado (m<sup>3</sup>)</b>	0,156	0,188	3,800	8,940	8,360	11,700
<b>Complexidade de Fabricação</b>	1°	2°	3°	4°	5°	6°

Dadas as propriedades mecânicas do granito sintético (principalmente dureza elevada e menor tenacidade ao impacto), caso sejam necessárias correções geométricas e dimensionais, a retificação com rebolos superabrasivos é o principal processo de usinagem que concilia correção de forma, acabamento e taxa de remoção de material sem introduzir defeitos críticos na estruturas que podem comprometer seu desempenho.

Quanto mais complexa a geometria e maior sua massa, maiores os desafios a serem superados em etapas subsequentes de usinagem, montagem e alinhamento.

Com base nos resultados encontrados quanto as deformações por ação gravitacional, as estruturas EC e EP foram as menos impactadas e, portanto, demandariam menor intervenção de acabamento, além de apresentarem as menores complexidades geométricas. Esses achados estão em consonância com as geometrias de máquinas-ferramentas mais encontradas no mercado. Embora essa conclusão fosse considerada de senso comum entre especialistas da área, não foi encontrada na literatura uma comprovação técnica científica que corroborasse com esse entendimento, sendo este um resultado importante desta pesquisa.

A estrutura que apresentou a menor massa e volume foi a EC seguida da EP, enquanto a ETD e a EO apresentaram as maiores massas.

Outro achado importante ao se analisar a Tabela 4.11 diz respeito a menor massa da EOT em relação a EO.





## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou uma análise comparativa estática e dinâmica das estruturas EC, EP, ET, EO, ETD e EOT. Foram analisadas a ação da gravidade sobre as estruturas, a ação das forças de usinagem atuando sobre as estruturas isoladamente e o caso das ações simultâneas das forças de usinagem e a da ação da gravidade.

No levantamento bibliográfico não foram encontrados trabalhos que apresentem as propriedades mecânicas e térmicas simultaneamente de uma mesma amostra de granito sintético. Certamente a elaboração de copos de prova deste material e a realização de ensaios de resistência mecânica e térmica são necessários para aprimorar a simulação. Não foi objetivo deste trabalho de conclusão de curso realizar ensaios experimentais para determinar propriedades mecânicas e térmicas de diferentes composições de granito sintético. Futuramente esses ensaios serão realizados por outros pesquisadores do LEPU.

O SP definido com 400 mm de comprimento a partir da estrutura e um diâmetro de 150 mm não representou o caso crítico e real de um SP da maneira que se era esperado. O comprimento do SP de algumas estruturas necessitou de uma maior dimensão, deste modo, foi necessário dimensionar e definir um dado SP ou sistema de fixação concomitantemente ao projeto da estrutura do equipamento de modo que cada geometria possuísse um SP com comprimento e rigidez adequados. Além disso, as propriedades mecânicas do SP consideradas para os modelos estruturais analisados não foram ideais (condição indeformável) por limitações do programa de AEF quanto aos valores numéricos limitados.

A etapa pós-fundição da estrutura considerando a retificação para correção de erros causados pelo efeito da ação da gravidade mostrou-se importante para se aproximar ainda mais do caso real de fabricação da estrutura. A partir de uma estrutura deformada pela ação da gravidade e corrigida por meio de um processo de retificação, esta deverá ser submetida aos esforços de usinagem. Entretanto, a correção por meio da usinagem pode ser inviabilizada devido à dificuldade de a ferramenta acessar áreas internas da estrutura. As estruturas de mais fácil acesso são a EC e EP.

Apesar das estruturas básicas analisadas terem passado por diversas iterações para otimização e estarem de acordo com a delimitação do projeto, não se descarta a possibilidade de existirem estruturas similares de menores massas, volumes e até mesmo que apresentem melhores desempenhos estáticos e dinâmicos.

A simulação com relação a efeitos térmicos que atuam na estrutura mostrou-se uma excelente opção para complementação da análise. Esta simulação já foi discutida na literatura por alguns autores como Lovo *et al.* (2018), Chen *et al.* (2015) e Shore *et al.* (2005), e seu efeito possui uma relevância na seleção e dimensionamento estrutural. Análises em trabalhos futuros também devem ser realizadas pelo grupo de pesquisa.

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho abordou o estudo relativo preliminar de estruturas de minimáquinas ferramentas de UP visando um projeto melhorado quanto a rigidez, massa, geometria e aspectos favoráveis e desfavoráveis da sua manufatura. Foram projetadas estruturas básicas seguindo o sistema de coordenadas cartesianas, envelope útil de trabalho de 400 mm x 400 mm x 400 mm, rigidez estática de 1 000 N/ $\mu$ m e seleção do granito sintético como material estrutural.

Conclui-se que é possível obter a rigidez estática desejada independentemente da geometria estrutural, porém algumas geometrias apresentam maior complexidade de fabricação e massa que podem acarretar em maiores deformações por ação da gravidade.

A metodologia proposta se mostrou eficiente e auxiliou no desenvolvimento do projeto preliminar de modo a orientar as tomadas de decisões e organizar os passos do desenvolvimento do projeto. A metodologia de projeto bem definida é decisiva na concepção da organização do trabalho, andamento do projeto e resultados.

O Software *Autodesk Fusion 360*<sup>®</sup> possibilitou que as simulações em nuvem fossem realizadas de forma rápida, auxiliando assim na realização de diversas iterações para convergir nas estruturas finais. Foi identificada limitação quanto a inserção de propriedades de um material considerado ideal (indeformável).

Observou-se que a influência da ação da gravidade é de suma importância para o projeto da estrutura de uma minimáquina ferramenta UP. Processos para correção geométrica e dimensional, como a retificação por exemplo, podem corrigir as deformações oriundas desta força, no entanto, as tensões se mantem.

Considerando as dimensões externas e massas das estruturas EP e EC obtidas neste trabalho, verificou-se que estas são consideravelmente superiores às massas das máquinas similares disponíveis comercialmente para as condições de contorno consideradas. Portanto, os resultados desta pesquisa não podem ser diretamente comparados as estruturas comerciais, principalmente quanto as propriedades do granito sintético. Os valores das principais propriedades mecânicas foram obtidos da literatura, sendo adotados os limites inferiores, ocasionando aumento das massas e dimensões das estruturas.

Verificou-se que as estruturas EC e EP são as que possuem maior facilidade de fabricação por simplicidade geométrica e sofrerem menores desvios pela ação da gravidade. Além de possuírem menor massa, deste modo necessitam de menor quantidade de material para confecção. Este resultado está condizente com o cenário atual das estruturas de UP uma vez que parte considerável dos equipamentos existentes utiliza das estruturas EC e EP por conciliar custo, desafio de fabricação e desempenho.

As estruturas ET e EO são estruturas intermediárias dito que não atingiram os melhores e nem os piores resultados. No entanto, quando comparadas as estruturas ET se destacam por possuírem menores deformações por ação da gravidade além de demandarem menos desafios de fabricação.

A partir dos resultados na análise estática, observa-se que a estrutura EO se sobressai quando comparada a EOT. As massas apresentadas por essas estruturas são próximas, no entanto a complexidade de fabricação da EOT é maior por conta do número de ressalto.

A estrutura ETD possui a maior dificuldade para fabricação, além de maior massa. Outra conclusão é que essa estrutura atingiu os piores resultados de simulação estática dentre as demais estruturas. Sendo assim a menos indicada para aplicação de máquina ferramenta UP.

## 7 PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS

- Realização de ensaios de diferentes formulações de granito sintético para determinação de densidade, módulo de Young, coeficiente de Poisson, limite de escoamento, resistência à tração, resistência à compressão, condutividade térmica, coeficiente de dilatação térmica linear e calor específico.
  - Estudo referente aos efeitos térmicos de usinagem.
  - O estudo e detalhamento do sistema de cabeçote e SP de usinagem, individual para cada uma das estruturas.
    - Estudo de outras geometrias como, por exemplo a piramidal ou cubo vazado.
    - Detalhamento do projeto mecânico considerando guias lineares, fusos, mancais, cabeçotes, insertos, superfícies funcionais e geometria otimizada.
    - Outras condições de contorno de projeto.



## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, S. F.; JAGADEESHA, T. Modelling and dynamic simulation of polymer concrete material for machine tool structure of a lathe. **Materials Today: Proceedings**, 2021.
- ARAUJO, L. A. O. **Projeto conceitual e construção de um protótipo de uma minimáquina para o corte de substrato de Alumina**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.
- ATEŞ, 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.
- AXINTE, D.; ABDUL, S. S.; SHUKOR, S. An Analysis of the Functional Capability of an In-House Developed Miniature 4-Axis Machine Tool. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 50, 2010.
- BAXTER, M. **PROJETO DE PRODUTO: Guia pratico para o design de novos produtos**. 2ª. ed. São Paulo : Blucher, v. rev., 1998.
- BEIGANG, J. Home made epoxy granite cnc. **YouTube**, 2019. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=2woA1BxZ7Pg>>. Acesso em: 07 outubro 2019.
- BELL, J. L. E90: Self-Replicating Milling Machine. **blogs.sccs.swarthmore.edu**, 2012. Disponível em:<< <http://blogs.sccs.swarthmore.edu/julianleland/engineering/academic-projects/e90-senior-design-self-replicating-mill>>>. Acesso em: 20 Julho 2018.
- BLANCHARD, B. S.; FABRYCKY, W. J. **Systems Engineering and Analysis**. 3ª ed. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1998.
- BRADLEY, S. H.; ANNA, C. T. Precision machine design assistant: A constraint-based tool for the design and evaluation of precision machine tool concepts. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing**, p. 11, 1998.
- BRINKSMEIER, E. et al. Ultra-precision grinding. **ELSEVIER**, v. 59, n. 2, p. 652-671, 2010.
- CALLISTER, W. D. J.; RETHWISH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. 8ª. ed. [S.l.]: LTC Livros técnicos e científicos editora ltda, 2012.
- CARBÓ, H. M. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. São Paulo: ArcelorMittal Inox Brasil, 2008.
- CHAPMAN, G. Ultra-precision Machining Systems: an Enabling Technology for Perfect Surfaces. **Nano Techsys**, 2004. Disponível em: <<http://www.nanotechsys.com/technology/technical-papers/>>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- CHEN, T.-C. et al. **Design analysis of machine tool structure with artificial granite material**. [S.l.]: Advances in Mechanical Engineering, v. 8, 2016.



CHEN, W. et al. An integrated system for ultra-precision machine tool design in conceptual and fundamental design stage. **Springer-Verlag**, Londres, 2015.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005.

CIUPAN, M.; CIUPAN, E. Comparison of machine-tool structures made of cast iron or mineral casting. **International Conference on Quality and Innovation in Engineering and Management**, n. 4th, 2016.

CIUPAN, M.; POPA, M. Mechanical properties of the structural elements of machine-tools. **TECHNICAL UNIVERSITY OF CLUJ-NAPOCA, ACTA TECHNICA NAPOCENSIS**, v. v. 61, n. n. 1, p. 121-130, Março 2018.

CLEBREAK. Projeto CNC. **YouTube**, 2018. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=NxSBveews9M>>. Acesso em: 23 agosto 2019.

COLAFEMINA, J.; JASINEVICIUS, R.; DUDUCH, . Surface integrity of ultra-precision diamond turned Ti (commercially pure) and Ti alloy (Ti-6Al-4V). **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Engineering Manufacture.**, v. 221, n. 6, p. 999-1006., 2007.

COSTA, I. S. **Uso de calorimetria para estimativa da distribuição do calor gerado no processo de furação de ferro fundido**. Uberlândia: Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

CRUZ, J. H. D. Proposta de uma máquina para processo de abrasão baseado na combinação de algumas características da lapidação e retificação. **Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia**, p. 87, 2009.

DAMTEW, A. W. **Experimental Investigation on Weld Ability of Cast Iron**. [S.l.]: Science Discovery, v. 3, 2015.

DOBZANSKI, L. A. Significance of materials science for the future development of societies. **Journal of Materials Processing Technology, ELSEVIER**, 2006. 133–148.

ERBE, ; KRÓL, ; THESKA,. MINERAL CASTING AS MATERIAL FOR MACHINE BASE-FRAMES OF PRECISION MACHINES. **Twenty-third Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering and Twelfth ICPE**, Oregon, 2008.

FILIPOWSKI, C. Concrete Lathe. **YouTube**, 2016. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=SafDAe2q\\_yk&list=PLsvIHjWVzxdmcbnr6KO8gJWSKDK-UZo1F&index=2](https://www.youtube.com/watch?v=SafDAe2q_yk&list=PLsvIHjWVzxdmcbnr6KO8gJWSKDK-UZo1F&index=2)>. Acesso em: 4 abril 2019.

FIOCCHI, A. A. Avanços no desenvolvimento de um processo de acabamento para peças planas submetidas à cinemática de lapidação sobre um rebolo dressado com grau de recobrimento. **Faculdade de Engenharia de Bauru – Dissertação para obtenção de título de mestrado**, Bauru - SP, 2010.

FIOCCHI, A. A. **Ciencia e tecnologia da manufatura de ultraprecisão de cerâmicas avançadas: Lapidoretificação Ud de superfícies planas de zircônia tetragonal policristalina estabilizada com ítria**. São Carlos, p. 327. 2014.

FIOCCHI, A. A.; FORTULAN, C. A.; SANCHEZ, L. E. D. A. Ultra-precision face grinding with constant pressure, lapping kinematics, and SiC grinding wheels dressed with overlap factor. **International Journal, Advanced Manufacturing Technology**, v. v. 79, n. n. 9, p. p. 1-13, 2015.

FIVESGROUP. [www.fivesgroup.com](http://www.fivesgroup.com), 2022. Disponível em: <<https://www.fivesgroup.com/high-precision-machines/grinding-ultra-precision/grinding-ultra-precision/why-us>>. Acesso em: 06 fev. 2022.

GONÇALVES, J. A. V. et al. **Mechanical properties of epoxy resin based on granite stone powder from the Sergipe fold-and-thrust belt composites**. 4. ed. [S.l.]: Materials Research, v. 17, 2014.

HEGNER, J. DIY CNC Epoxy Granite. **YouTube**, 2015. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=-0Cn0WRXPkS>>. Acesso em: 23 agosto 2019.

HUO , D.; CHENG , K.; WARDLE ,. Um projeto dinâmico integrado holístico e abordagem de modelagem aplicada ao desenvolvimento de máquinas de micro-fresamento de ultraprecisão. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 50, p. 335–343, 2010.

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**, v. 222(1), p. 1–13., 2008. ISSN doi:10.1243/09544054jem839.

JANCAR, J.; DIANSELMO, A.; DIBENEDETTO, A. T. **The Yield Strength of Particulate Reinforced Thermoplastic Composites**. 18. ed. [S.l.]: POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE, v. 32, 1992.

JASINEVICIUS, G. Influência da Transição de Fase Sobre os Limites de Ductilidade Observados na Usinagem de Ultraprecisão de Silício Monocristalino. **Universidade Federal de São Carlos**, São Carlos, v. tese (doutorado em Engenharia Mecânica), 1998.

KAWAHARA, N. et al. Microfactories; new applications of micromachine technology to the manufacture of small products. **Microsystem Technologies**, n. 3, p. 37–41, 1997.

KEPCZAK, N.; LOWSKI, W. P. Application of Mineral Casting for Machine Tools Beds. **Mechanics and Mechanical Engineering**, Łódź, v. v. 17, n. n. 4, p. 285-289, 2013.

KERN. Machines: KERN Pyramid Nano, 2020. Disponível em: <<https://en.kern-microtechnik.com/downloads#maschinen>>. Acesso em: 11 dez. 2021.

KERN. kern-microtechnik, 2022. Disponível em: <<https://www.kern-microtechnik.com/>>. Acesso em: 06 fev. 2022.

KHALID, A.; MEKID, S. Design of precision desktop machine tools for meso-machining. **Elsevier Ltd**, Cardiff, UK, 2006. 165-170.

KIM, D.-S.; CHANG, I.-C.; KIM, S.-W. Microscopic topographical analysis of tool vibration effects on diamond turned optical surfaces. **Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology**, v. 26, 2002.

LEACH, R. K. **Fundamental Principles of Engineering Nanometrology**. 1. ed. [S.l.]: Elsevier, 2010.

LI, ; YANG, J.; LI, B. Dynamic Characteristics Analysis of a Micro Grinding Machine Tool. **3rd International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering (ICMME 2016)**, Shanghai, v. 95, n. 3<sup>a</sup>, 2016.

LI, et al. **Ultra-precision grinding of Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> crystals with graphene oxide coolant: Material deformation mechanism and performance evaluation**. [S.l.]: Processes, Journal of Manufacturing, v. 61, 2021.

LI, W.; LI, B.; YANG,. Design and dynamic optimization of an ultra-precision micro grinding machine tool for flexible joint blade machining. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 93, 2017.

LINDSEY, K. Tetraform Grinding. **Commercial Applications of Precision Manufacturing at the Sub-Micron Level**, v. V. 1573, 1992.

LINTZ, R. C. C. **Estudo de Materiais Alternativos para Fabricação de Estruturas de Máquinas-Ferramenta**. Universidade Estadual De Campinas. Campinas. 2003.

LOVO, J. F. P. et al. Synthetic granite composite for precision equipment structures. **Revista Materia**, São Carlos, v. V. 23, , n. N.4, 2018. ISSN doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0563.

LT ULTRA. www.lt-ultra.com. **lt-ultra**, 2022. Disponível em: <[https://www.lt-ultra.com/en/company/lt\\_ultra/](https://www.lt-ultra.com/en/company/lt_ultra/)>. Acesso em: 06 fev. 2022.

LUO, X. et al. **Design of ultraprecision machine tools with applications to manufacture of miniature and micro components**. [S.l.]: [s.n.], v. 167, 2005. p. 515-528 p.

MACHINERY. Smooth production. **A BIG LEAP IN MACHINING THE SMALLEST THINGS**, 2004. Disponível em: <<https://assets.markallengroup.com/article-images/3800/SmoothProduction.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2021.

MARIBONDO, J. D. F. Desenvolvimento de uma metodologia de projeto de sistemas modulares, aplicada a unidades de processamento de resíduos sólidos domiciliares. **Tese de Doutorado**. UFSC, Florianópolis, 2000.

MATWEB. MatWeb,LCC, 2022. Disponível em: <<http://www.matweb.com/>>. Acesso em: 09 março 2022.

MÖHRING, H.-C. et al. Materials in machine tool structures. **Elsevier Ltd**, n. 64. ed, 2015. 725–748 p.

MOREIRAS, S. T. F. **Metodologias para o dimensionamento de placas de “granitos” em sistemas não-aderentes de fixação**. [S.l.]: Tese (Doutorado) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering Design: A Systematic Approach**. 2ª ed. ed. [S.l.]: Springer, 1996.

PARK, C. H. et al. **Development of an Ultra Precision Machine Tool for Micromachining on Large Surfaces**. 4. ed. [S.l.]: International journal of precision engineering and manufacturing, v. 10, 2009.

PARK, H. W.; PARK, Y. B.; LIANG, . Multi-procedure design optimization and analysis of mesoscale machine tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 56, 2011.

PEREIRA, J. C. **Metodologia de projeto aplicada à concepção de sistemas mecatrônicos a partir da elaboração de um modelo prescritivo de desenvolvimento**. Belo Horizonte. 2016.

PEREIRA, M. **Metodologia de projeto para sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

PIRATELLI-FILHO, A.; SHIMABUKURO, F. Characterization of compression strength of granite-epoxy composites using design of experiments. **Materials Research**, São Carlos, v. v. 11, n. n. 4, p. 399-404, 2008. ISSN dx.doi.org/10.1590/S1516-14392008000400003.

RABAHI, R. F. **Análise da resistência mecânica de vigas de mármore sintético com carga reciclada**. Brasília: [s.n.], 2015.

RAMSWARNAK. A Homemade Lathe Machine made Using Concrete. **YouTube**, 2019. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=MXDkOWRX\\_6o](https://www.youtube.com/watch?v=MXDkOWRX_6o)>. Acesso em: 07 outubro 2019.

RIBEIRO, F. D. M. M.; PURQUERIO, B. D. M. **Granito sintético para estruturas de equipamentos de precisão de pequeno porte – metodologia de projeto**. Águas de Lindóia: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999.

SANCHEZ, L. E. A.; JUN, N. Z. X.; FIOCCHI, A. A. Surface finishing of flat pieces when submitted to lapping kinematics on abrasive disc dressed under several overlap factors. **Precision Engineering**, v. v. 35, n. 2, p. Pages 355-363, 2011.

SARAVI, S. S. et al. Design of serrate-semi-circular riblets with application to skin friction reduction on engineering surface. **International Journal of Flow Control**, v. 6, p. 83-92, 2014.

SCHROETER, R. B. **Usinagem de ultraprecisão de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho**. Florianópolis: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA

CATARINA, 1997.

SHAMRAY, S.; DANESHI, A.; AZARHOUSHANG, B. High efficiency, high speed grinding of a composite material consisting of polymer concrete and steel structures. **CIRP Conference on High Performance Cutting**, v. 46, 2016.

SHORE, ; MORANTZ, P. Ultra-precision: enabling our future. **Royal Society**, v. 370, n. 1973, 2012.

SHORE, P. et al. Big OptiX ultra precision grinding/measuring system. **Proceedings of SPIE**, Jena, Germany, v. 5965, 2005.

SILVA, A. L. D. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 2º. ed. [S.l.]: Eletrometal S.A. Metais Especiais, 1988.

SLOCUM, A. H. **Precision Machine Design**. New Jersey: Prentice Hall, 1992.

STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. **Metal Cutting Theory and Practice**. 3. ed. [S.l.]: CRC Press, 2016.

STEPHENSON, D. J. et al. Ultra-precision grinding of hard steels. **Precision Engineering**, v. 25, n. 4, p. 336–345, 2001. ISSN doi.org/10.1016/S0141-6359(01)00087-3.

STOETERAU, . Desenvolvimento de um prototipo de uma maquina-ferramenta comandada numericamente para usinagem de ultraprecisão com ferramenta de geometria definida. **Universidade Federal de Santa Catarina** , Santa Catarina, v. Tese de Doutorado, 1999.

STOETERAU, R. L. **Introdução ao Projeto de Máquina-Ferramentas Modernas**. [S.l.]: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

SUNADA, M. M. **Acionamento de um posicionador linear de ultraprecisão empregando uma redução harmonic drive com controle de velocidade**. Florianópolis: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2007.

TANIGUCHI, N. Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing. **CIRP Annals**, v. Vol. 32/2/1983. , p. p. 573-582, 1983.

TOYODA. toyoda. **https://www.toyoda.com/**, 2022. Disponível em: <<https://www.toyoda.com/br/sobre-toyoda>>. Acesso em: 06 fev. 2022.

UVA LIDKÖPING. **https://www.uvalidkoping.com/**, 2022. Disponível em: <<https://www.uvalidkoping.com/>>. Acesso em: 06 fev. 2022.

VRTANOSKI, G.; DUKOVSKI, V. **Design of polimer concrete main spindle housing for cnc lathe**. International scientific conference on achievements in mechanical and materials engineering. gliwice: ResearchGate. 2005. p. 668-698.

WANG et al. Numerical and experimental analysis of heat transfer in turbulent flow channels with two-dimensional ribs. **Applied Thermal Engineering**, p. 623-634, 2014.

WYSOCKI, P. F. CNC machine made out of granite. Disponível em. Acessado em: **YouTube**, 2019. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=gUFeoDfIYvM>>. Acesso em: 09 outubro 2019.

XU, G. et al. Curing behavior and toughening performance of epoxy resins containing hyperbranched polyester. **POLYMERS FOR ADVANCED TECHNOLOGIES**, v. 15, 2004.

YU, Z. et al. Interactive design assistance system of machine tool structure in conceptual and fundamental design stage. **Int J Autom Technol**, v. 4, n. 3, p. 303-311, 2010.

YUAN, J. et al. Review on the progress of ultra-precision machining technologies. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 12, n. 2, 2017.

ZAREENA, ; VELDHUIS, S. **Tool wear mechanisms and tool life enhancement in ultra-precision machining of titanium**. 2. ed. [S.l.]: Journal of Materials Processing Technology, v. 212, 2012.

ZHANG, ; TO, S. A theoretical and experimental investigation into multimode tool vibration with surface generation in ultra-precision diamond turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 72, 2013.

ZHANG, et al. Dynamic characteristics of an aerostatic bearing spindle and its influence on surface topography in ultra-precision diamond turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 62, 2012.

ZHANG, S. et al. Advances in ultra-precision machining of micro-structured functional surfaces and their typical applications. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. V. 142, p. 16-41, 2019.

ZHANG, S. J. et al. A review of machine-tool vibration and its influence upon surface generation in ultra-precision machining. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 91, 2015.

ZHU, N. X. J. **Análise de um processo abrasivo combinado em algumas características da lapidação e retificação**. [S.l.]: Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, 2004.