

Projeto de Desenvolvimento dos Membros Inferiores de um Robô Humanoide

Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica – Dezembro de 2020





MOTIVAÇÃO

CENÁRIO MUNDIAL

- Envelhecimento da população mundial
- Deficiências gerando mobilidade reduzida
- Necessidades emergenciais



Fonte: Folha de São Paulo, 2018



Fonte: Tech United



Fonte: Editora Abril, 2020



ROBOCUP – Humanoid League



RoboCup Humanoid League, Sydney, 2019

KidSize final - Robocup 2019

Rhoban vs ZJUDancer



Objetivo e justificativa do projeto

O objetivo é desenvolver o sistema estrutural mecânico dos membros inferiores (bem como pés, panturrilhas, coxas e cintura) de um robô humanoide destinado ao futebol de robôs com uma altura total de 1,75 m. O Projeto busca soluções para realizar a movimentação das articulações de seus membros de forma estável.



Fonte: freethink website

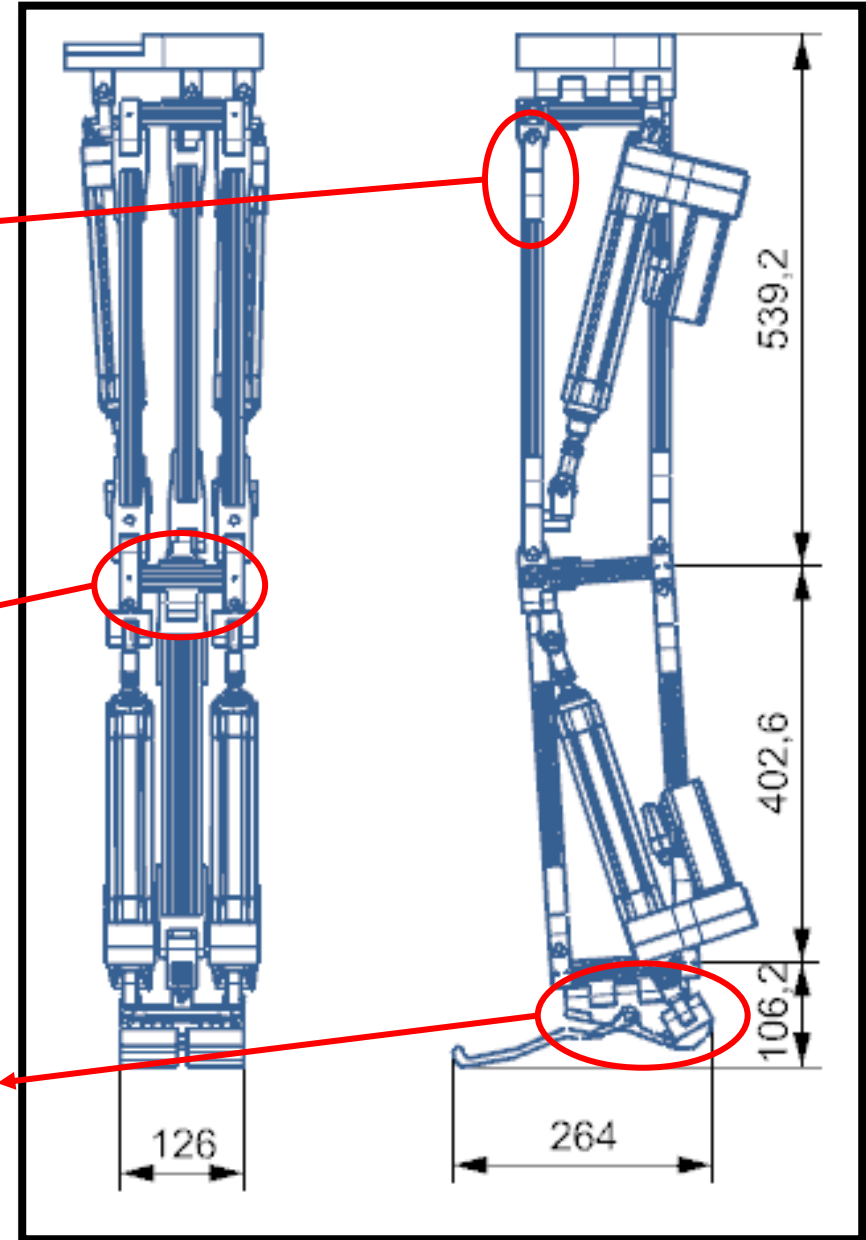
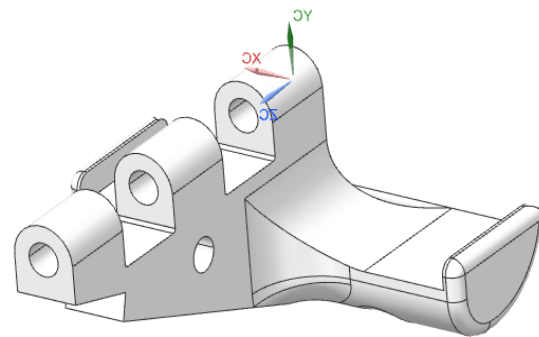
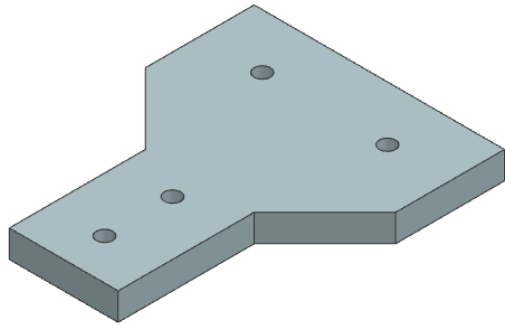
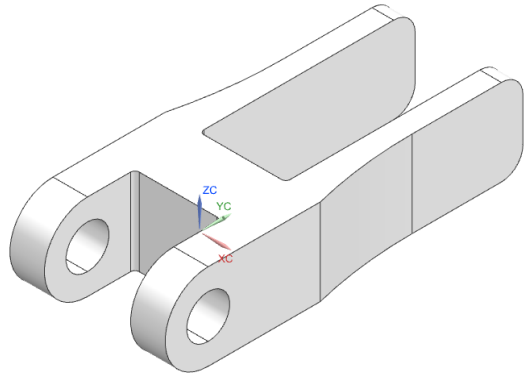


Objetivos específicos

- *MODELAGEM MECÂNICA VIRTUAL;*
- *DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS ESTRUTURAIS VIÁVEIS;*
- *ESTIMATIVA DOS ESFORÇOS E SELEÇÃO DOS ATUADORES;*
- *DESENVOLVIMENTO DA CADEIA CINEMÁTICA DO SISTEMA;*
- *SIMULAÇÕES ESTRUTURAIS COMPUTACIONAIS;*
- *SIMULAÇÕES DE MARCHA DO PROTÓTIPO;*
- *CÁLCULOS E ESTIMATIVA DE CUSTOS.*



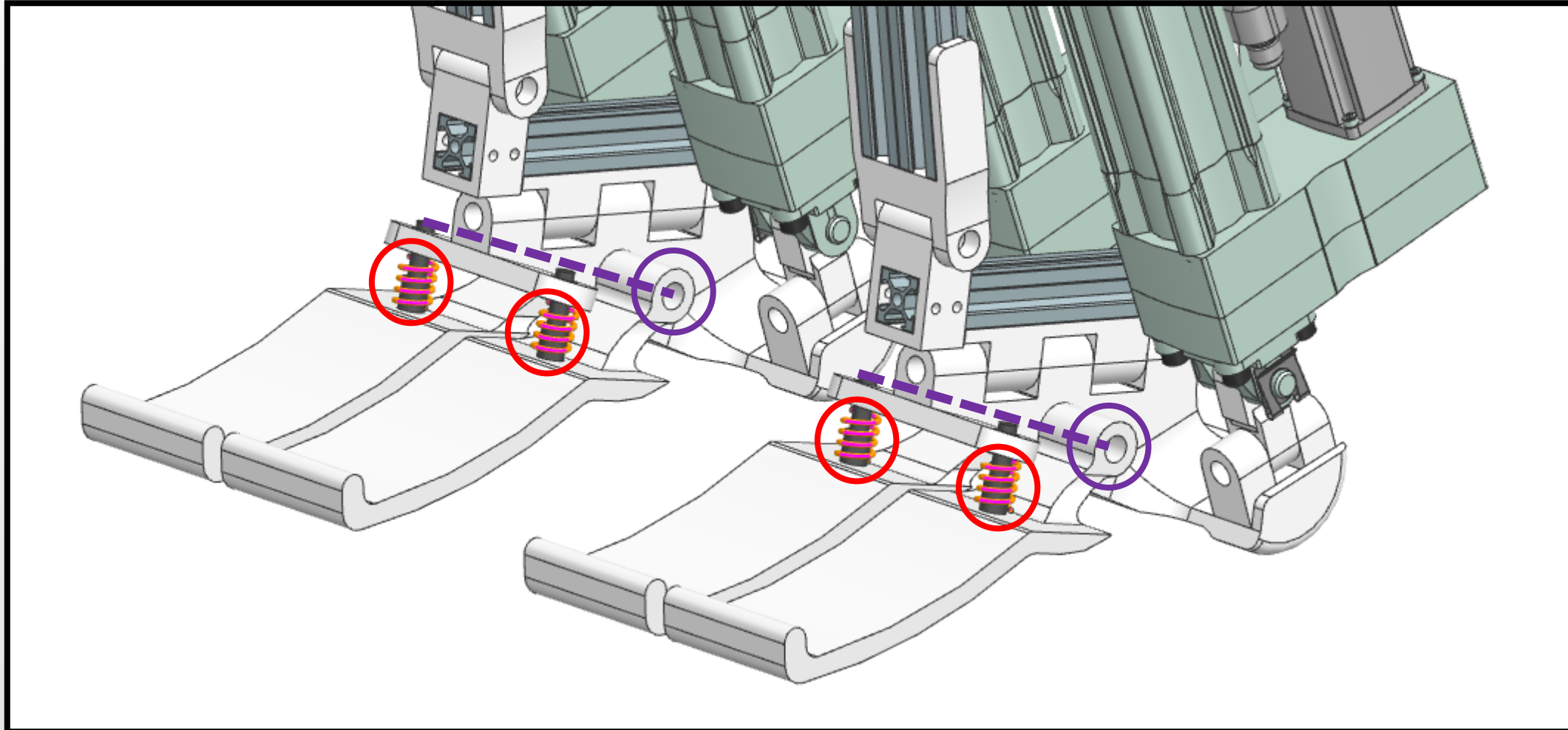
Modelo Real Cotado





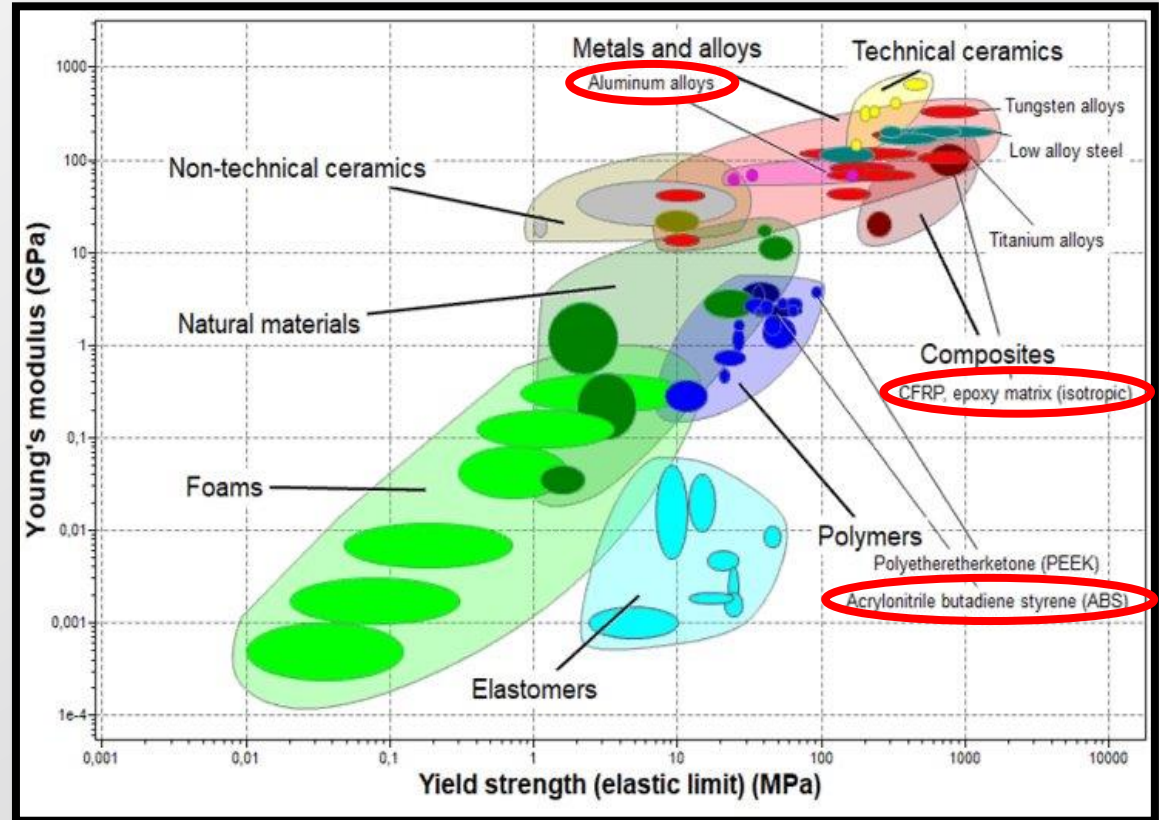
Mecanismo dos pés

- Redução de impactos e suavidade no andar





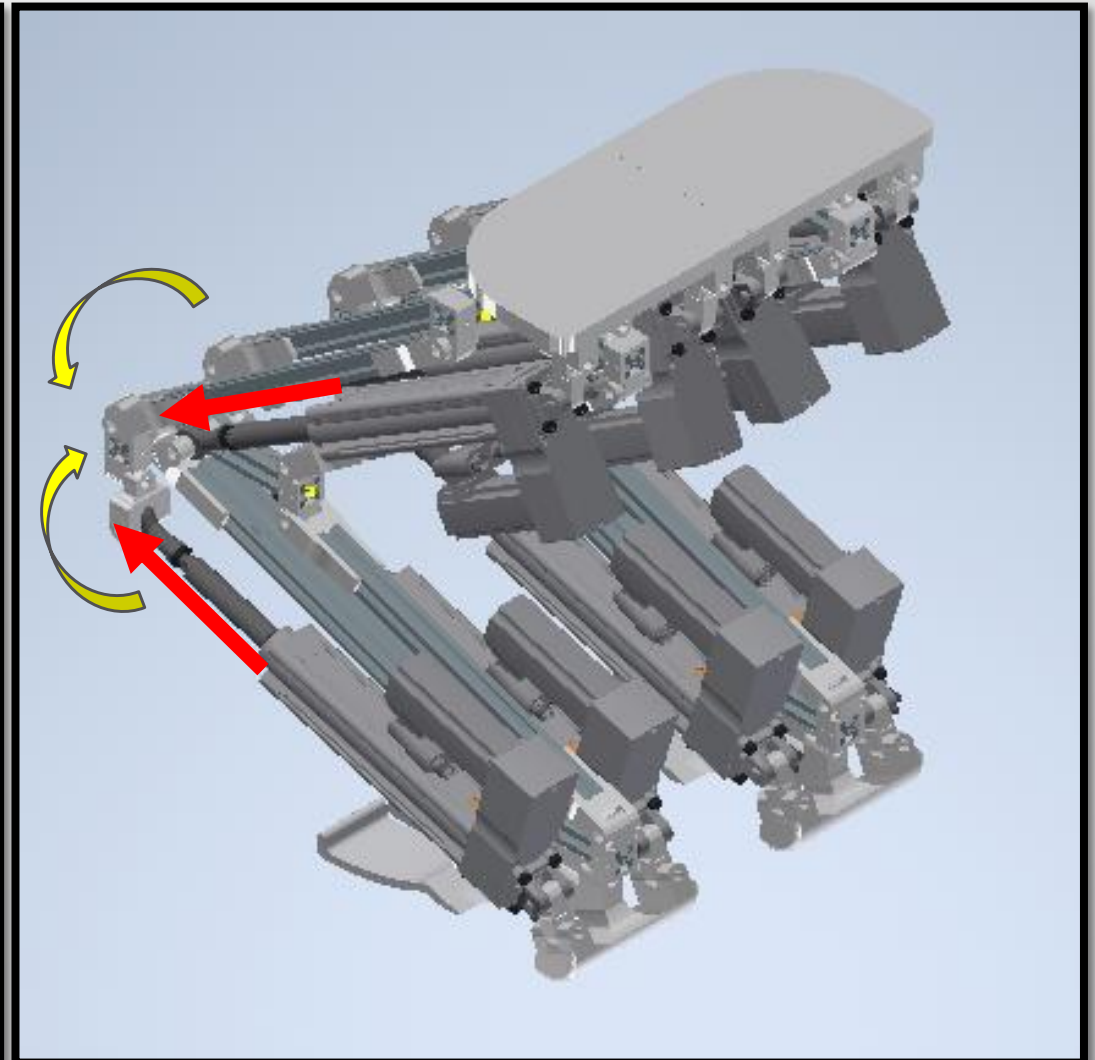
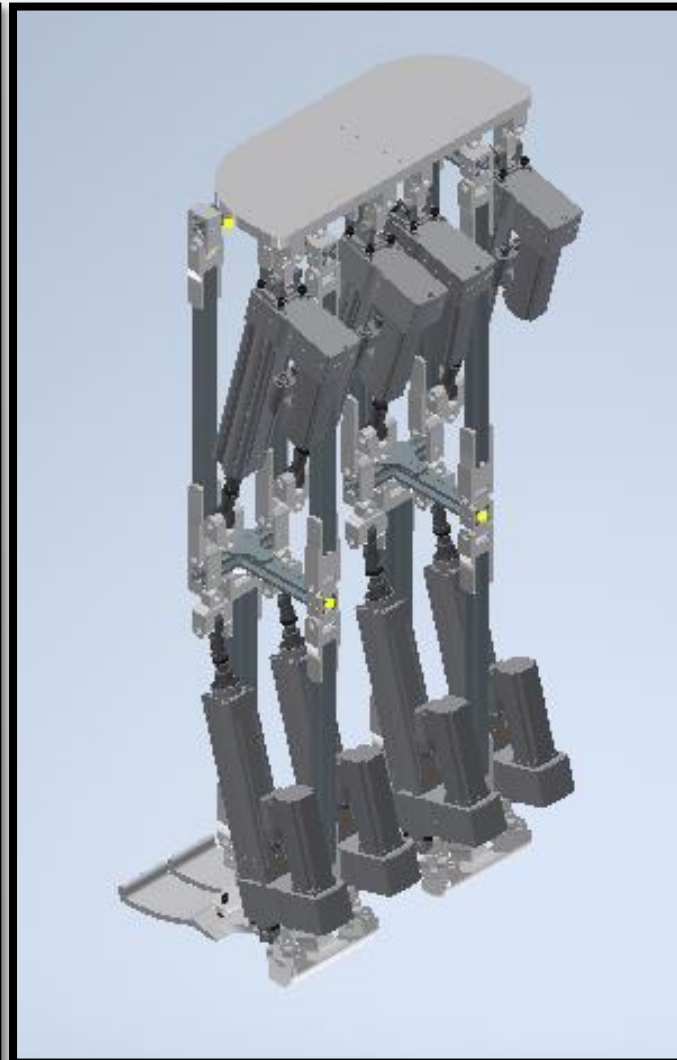
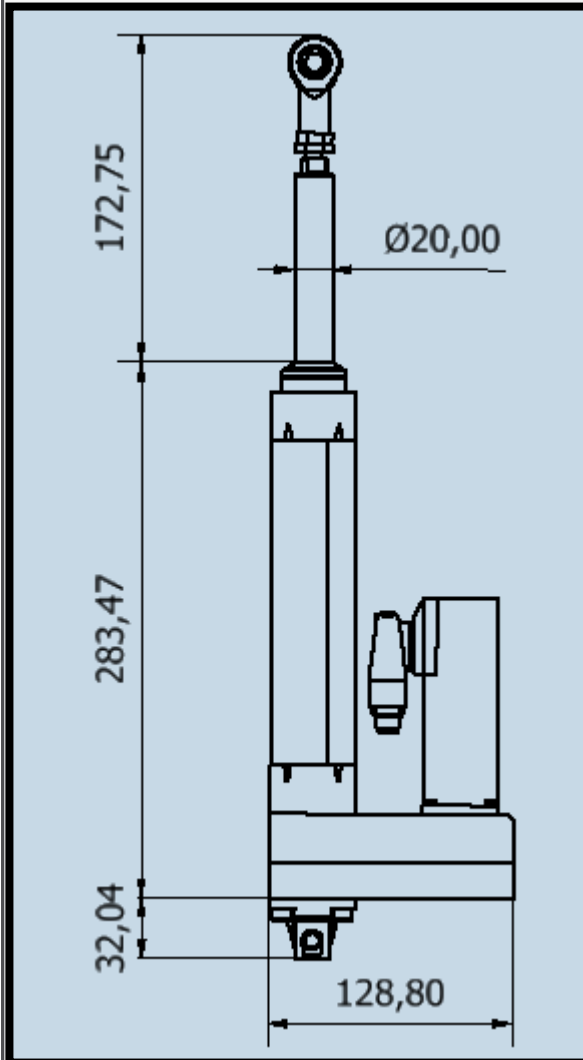
Vista Explodida



PRÉ-SELEÇÃO	
CORES	MATERIAIS
Yellow	Molas
Black	Fibra de Carbono
Grey	Perfis de alumínio
White	Juntas de alumínio
Brown	Atuadores

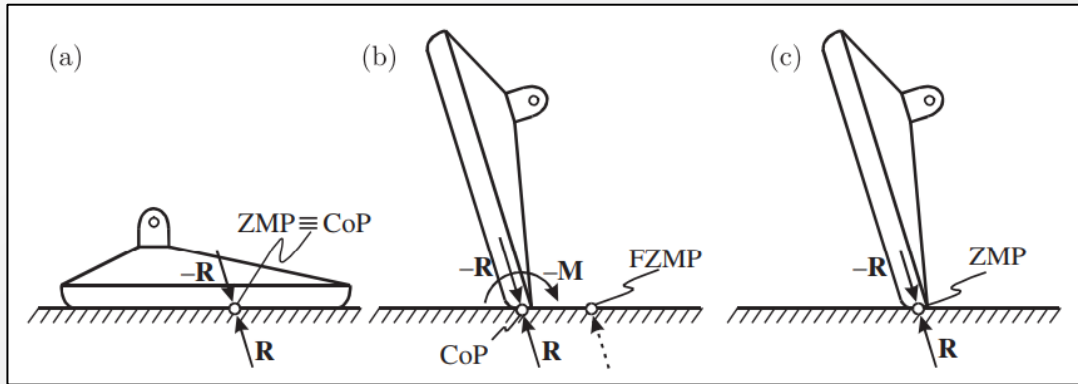


Funcionamento dos Atuadores Lineares

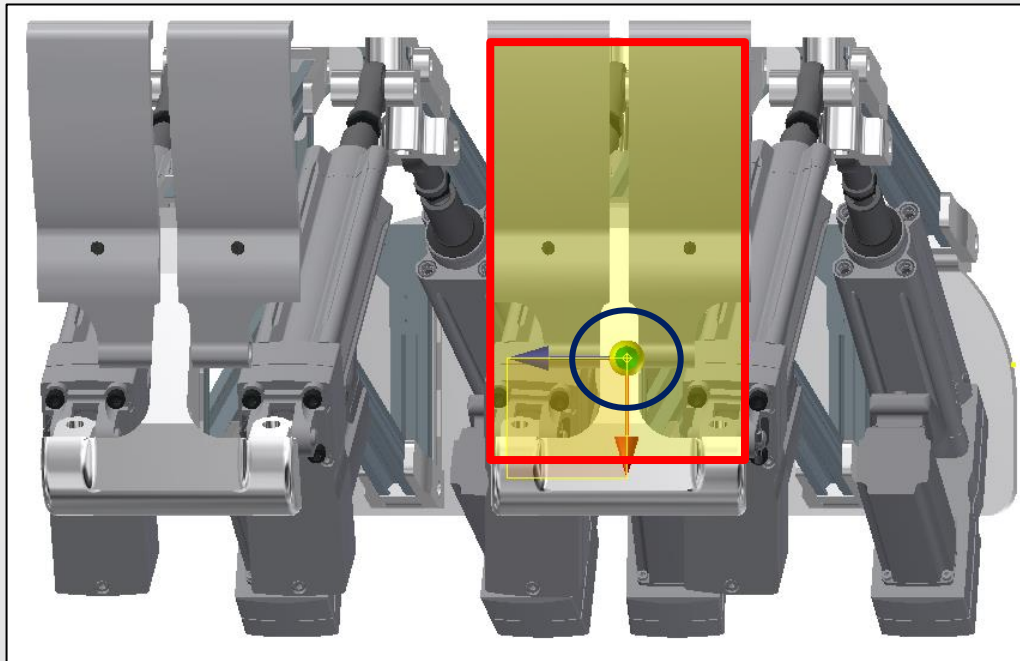




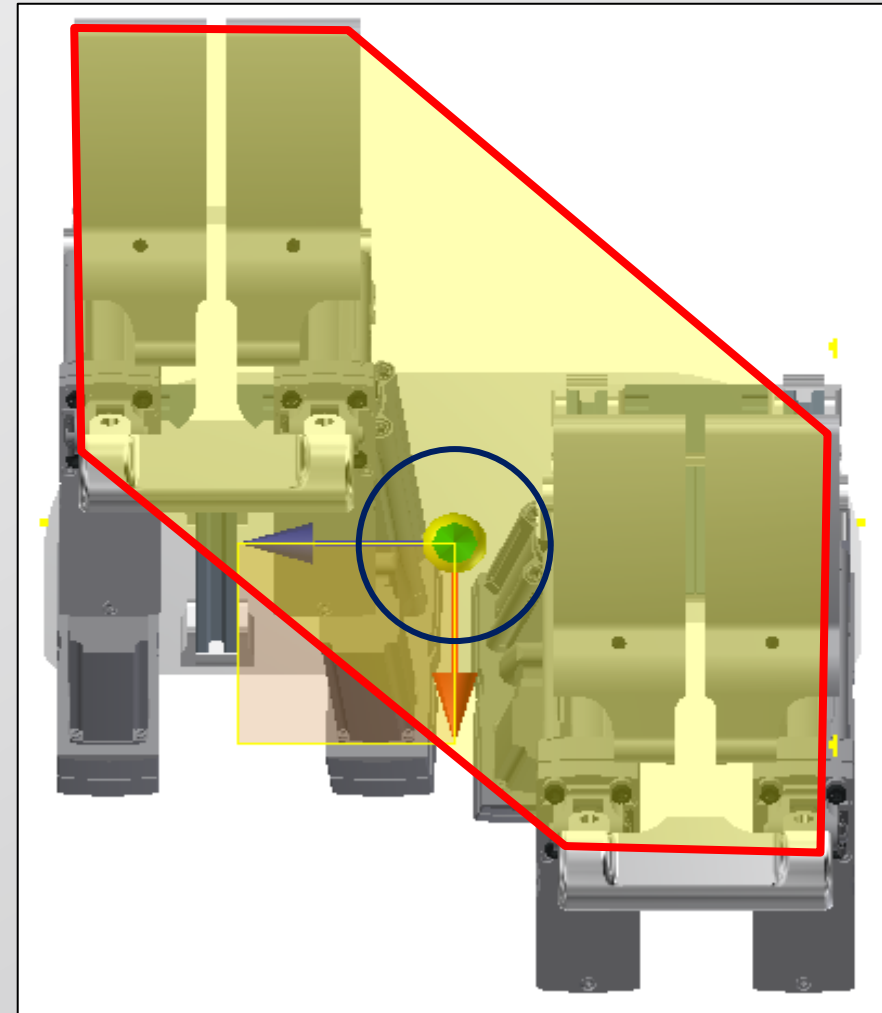
Método de verificação da estabilidade



Metodologia ZMP



Polígono de suporte com “base única de apoio”



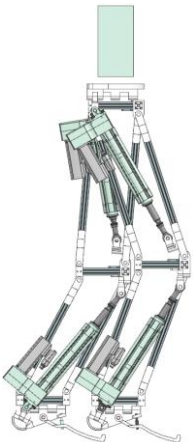
Polígono de suporte com “base dupla de apoio”



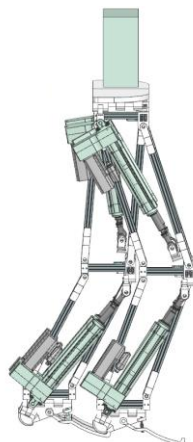
Metodologia do andar

Etapas Cíclicas do Andar (Linhas)	
Frames de Des Canço	FDC#
Frames de P rimero P asso	FPP#
Frames de P assos com o pé E squerdo	FPE#
Frames de P assos com pé D ireito	FPD#
Frames de R etorno com o pé E squerdo	FRE#
Frames de R etorno com o pé D ireito	FRD#

FPE1



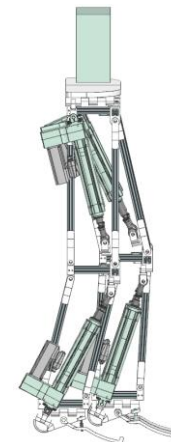
FPE2



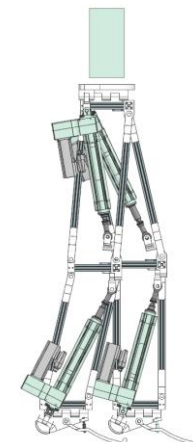
FPE3



FPE4



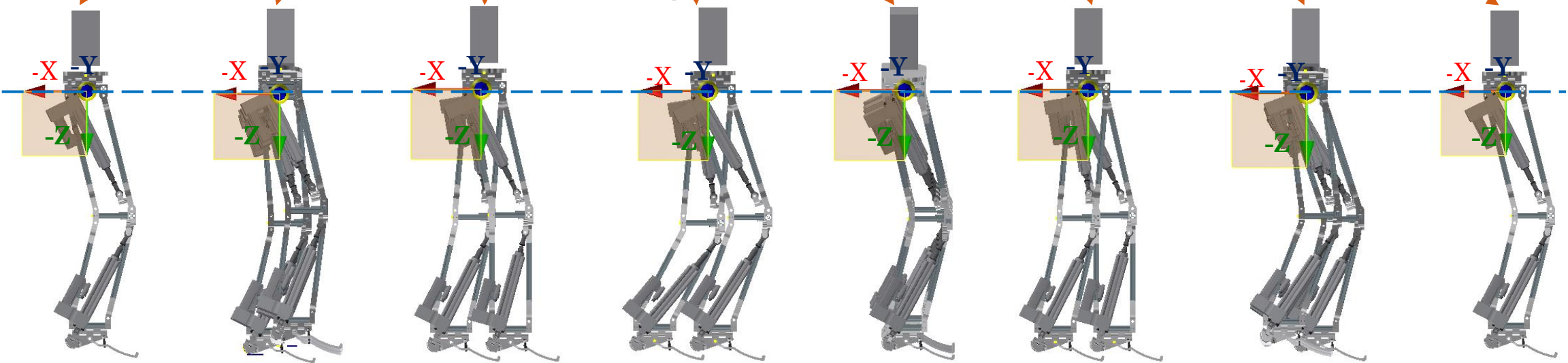
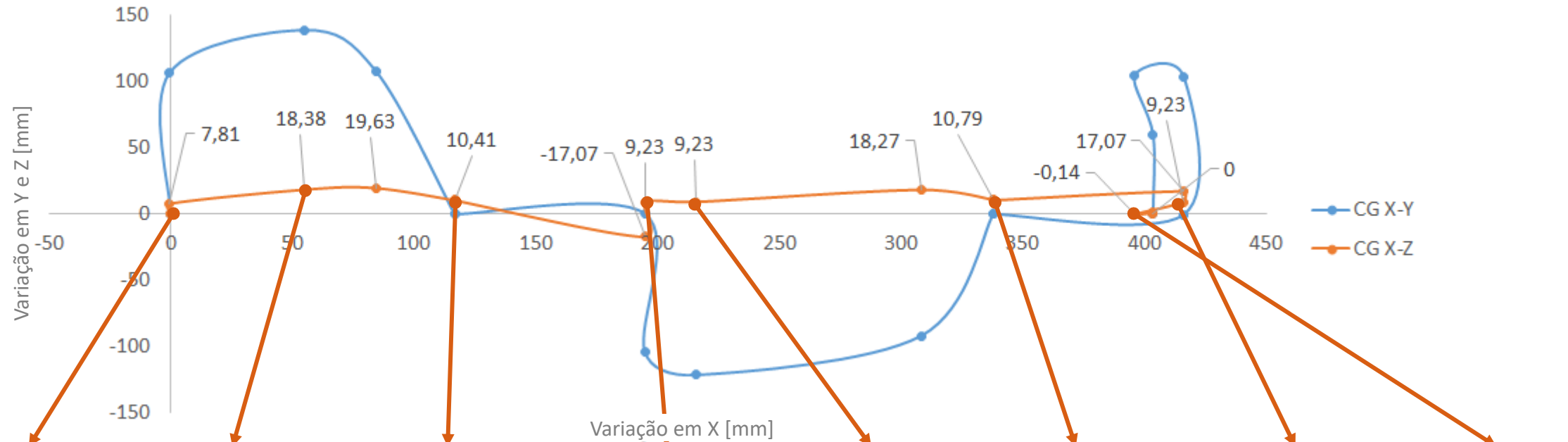
FPE5





Gráficos de Deslocamento do CG

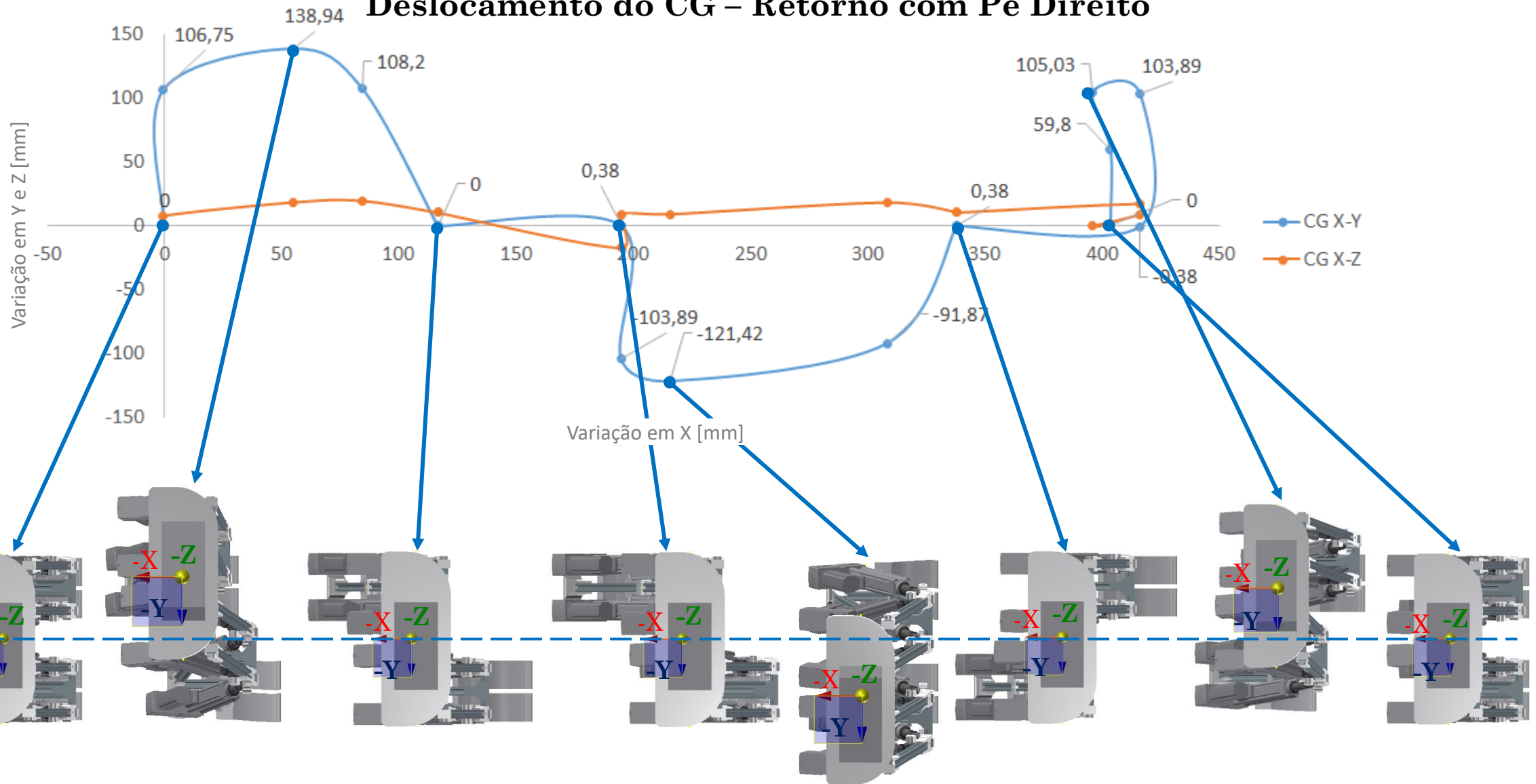
Deslocamento do CG – Retorno com Pé Direito

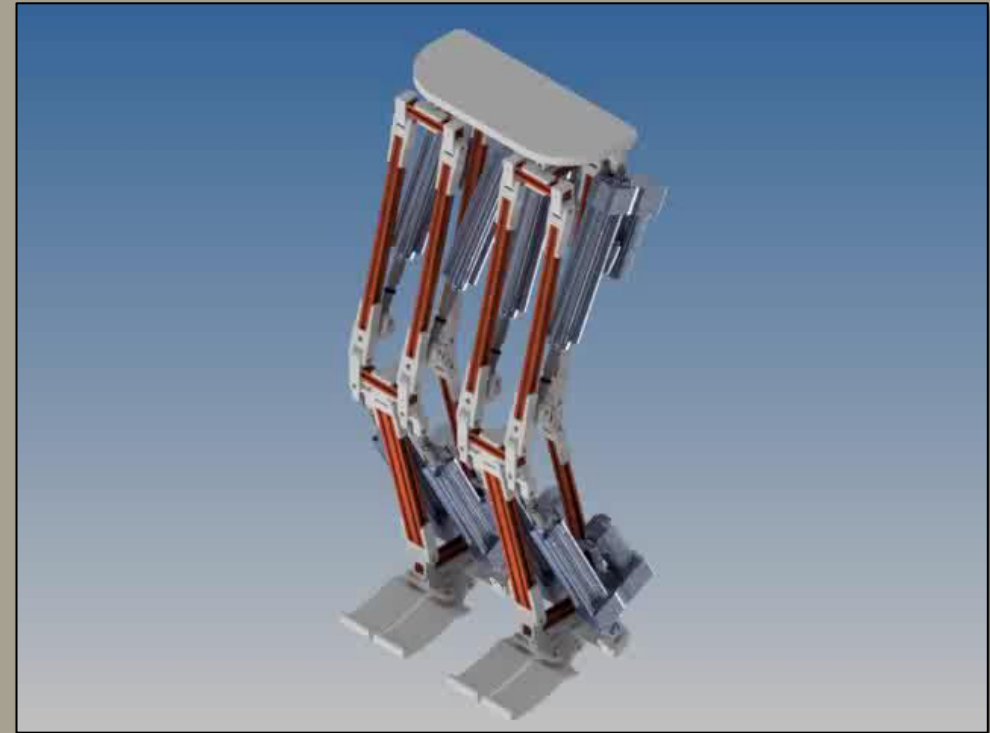
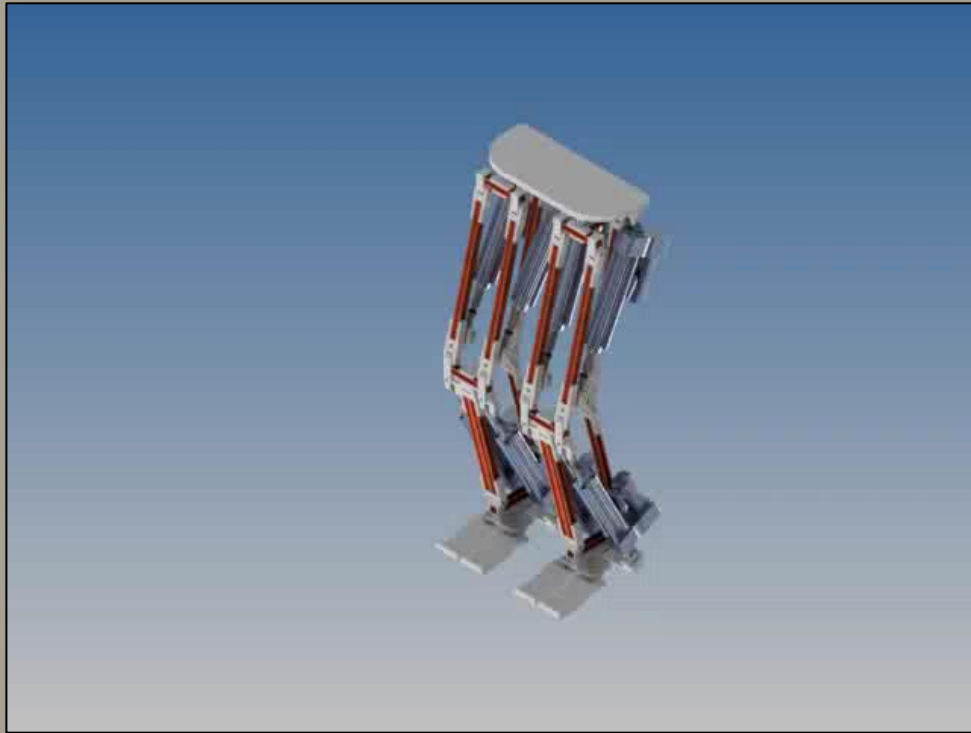




Gráficos de Deslocamento do CG

Deslocamento do CG – Retorno com Pé Direito

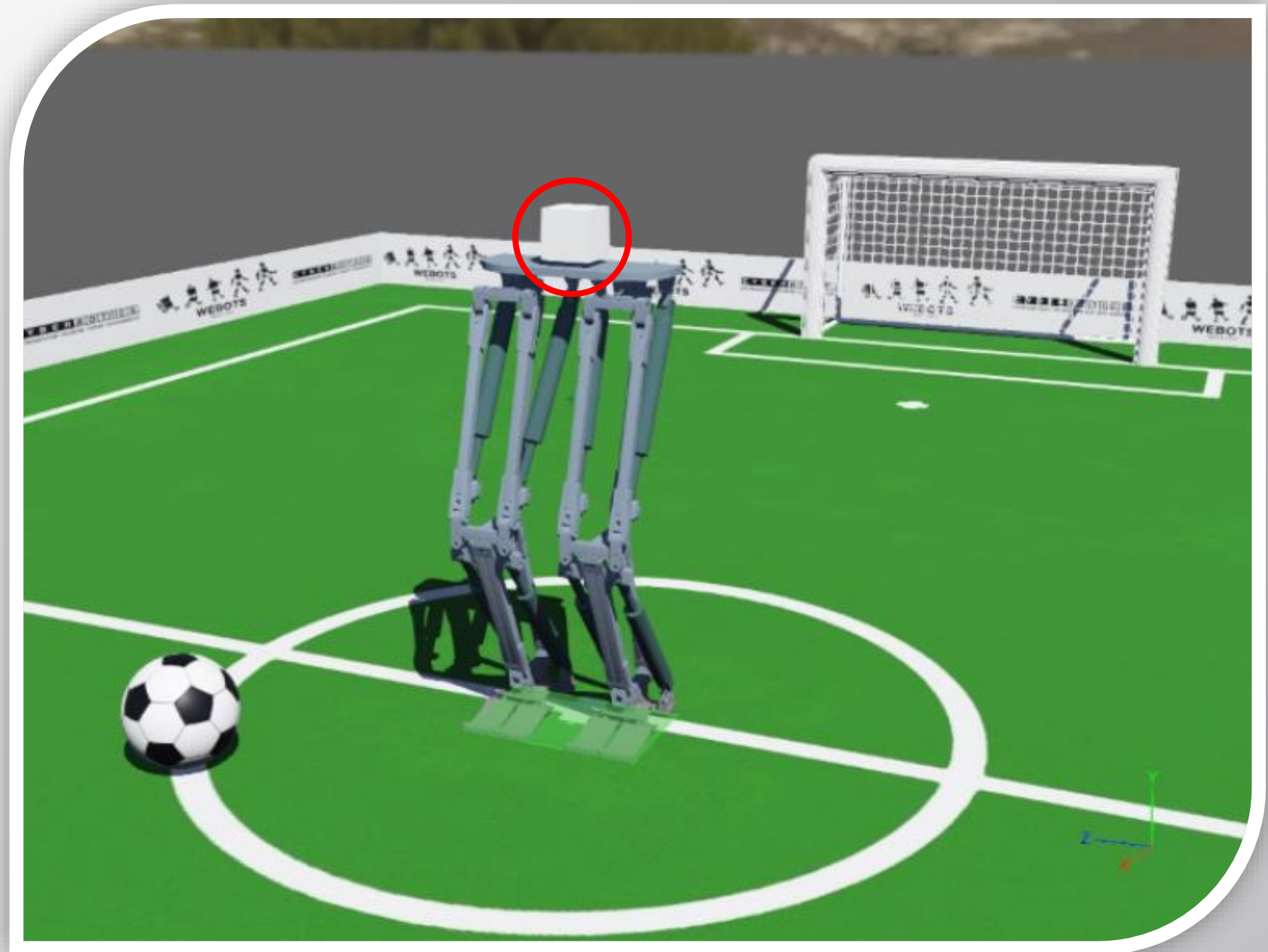




Cadeia Cinemática



Simulações Dinâmicas: Parâmetros de entrada





Simulações Dinâmicas: Teste de estabilidade





Esforços dos atuadores

CS = 1,63

1. Peso do robô completo estimado em 75 kg
2. Torque no joelho: 272,25 N.m
3. Força em X para suportar o torque: 699,9 N
4. Força axial para suportar o torque: 615 N

Força registrada nos catálogos FESTO: 1000 N

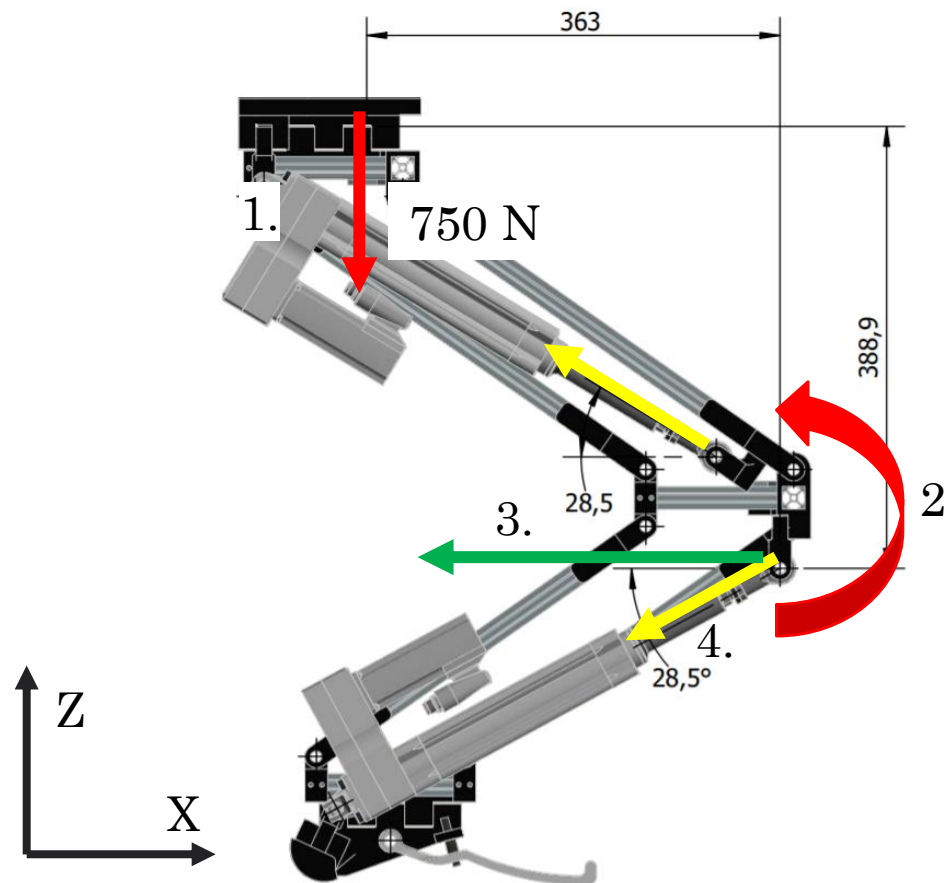
eixo elétrico ESBF-BS-32-100-5P

Código da peça: 8022562

☆ Linha de produtos básicos

Fuso com esferas recirculantes com acionamento elétrico que converte o movimento de rotação do motor em um movimento linear da haste.

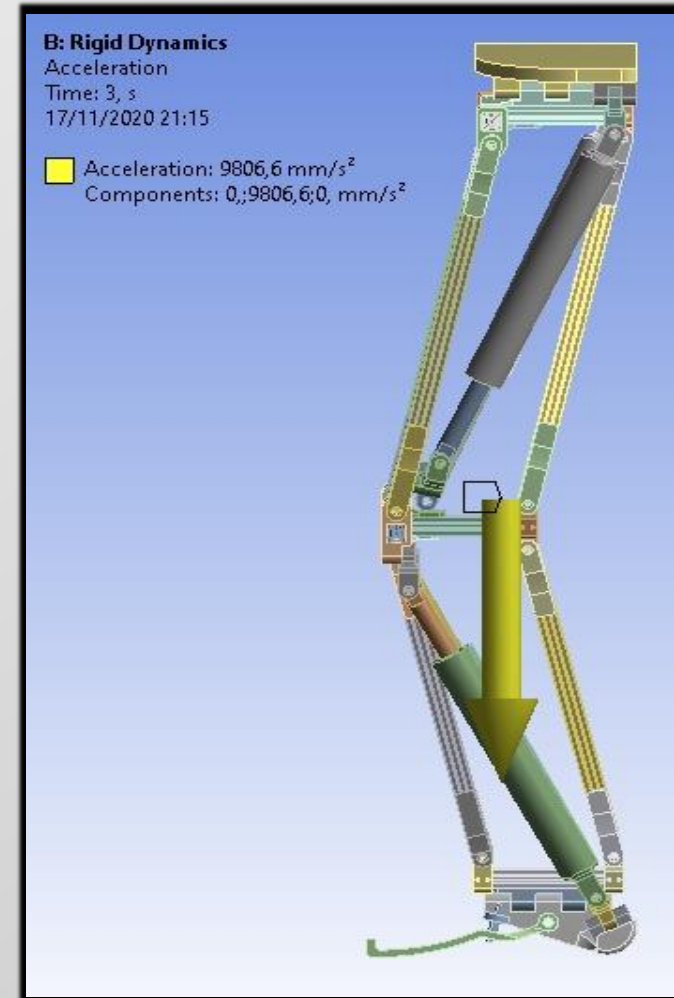
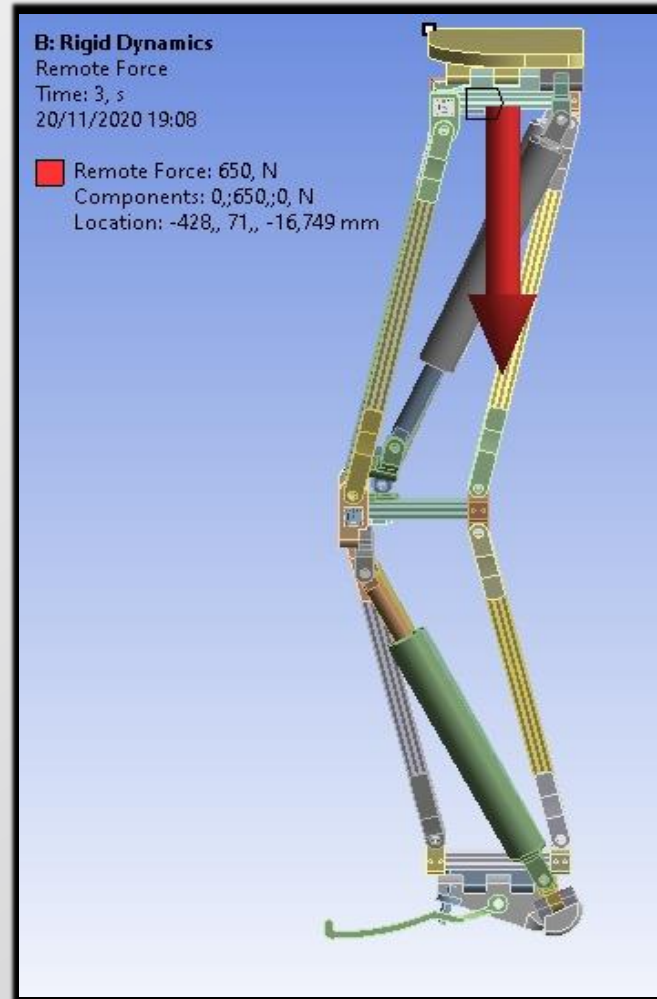
Classe de proteção	IP40
Temperatura ambiente	0 ... 60 °C
Torque de acionamento máximo	1,1 Nm
Força radial máxima no eixo motor	115 N
Máx. força de avanço F _x	1.000 N
Torque de acionamento sem carga	0,1 Nm
Valor de referência para carga útil, horizontal	100 kg
Valor de referência para carga útil, vertical	100 kg





Simulação de Corpo Rígido: Parâmetros e condições de contorno

- Velocidades em cada atuador: 125 mm/s (max)
- Força peso: 650 N***
- Aceleração da gravidade: 9806,6 mm/s²





Simulação de Corpo Rígido : Forças em cada atuador

CS = 1,11

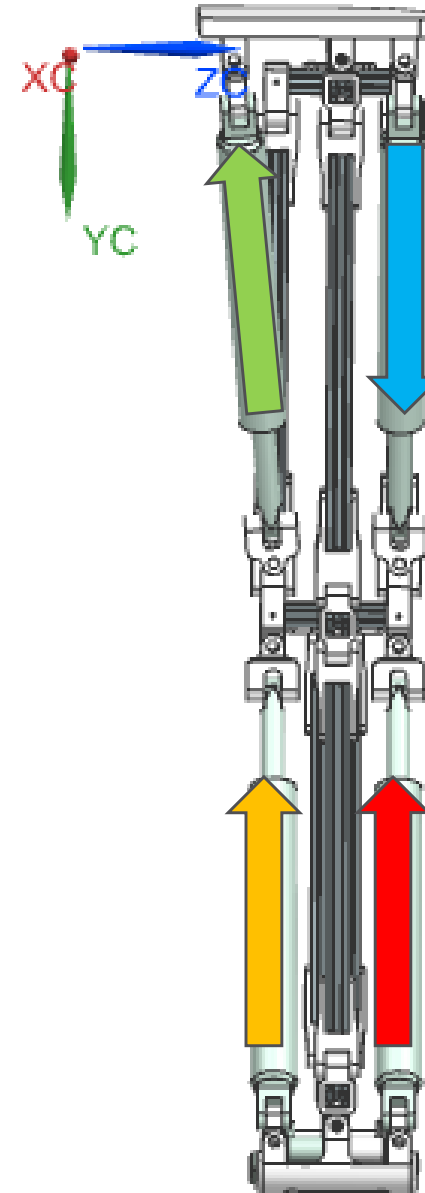
- Resultados obtido em cada atuador:

- 268,58;
- -362,85;
- 309,10;
- 896,34.

Cálculo do erro de estimativa:

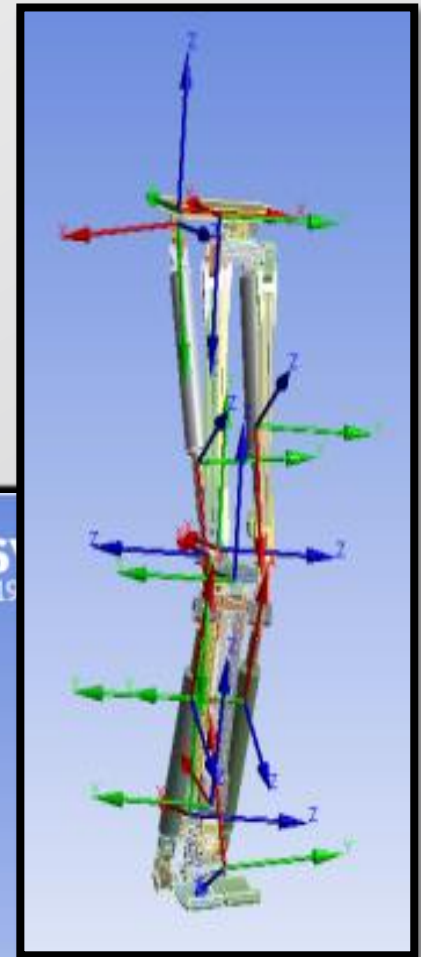
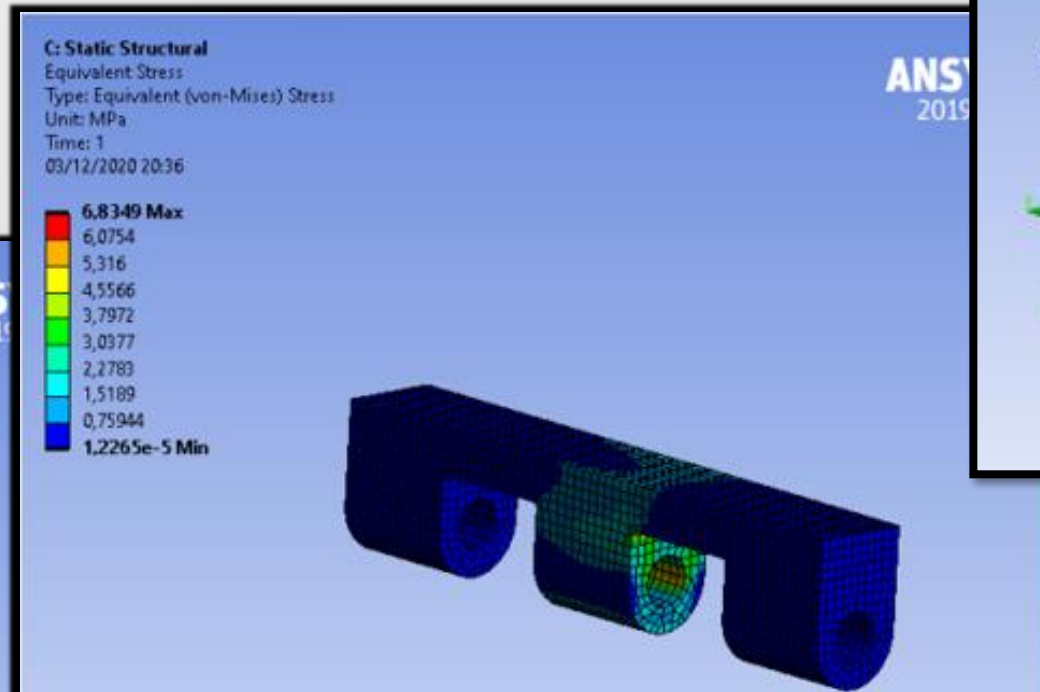
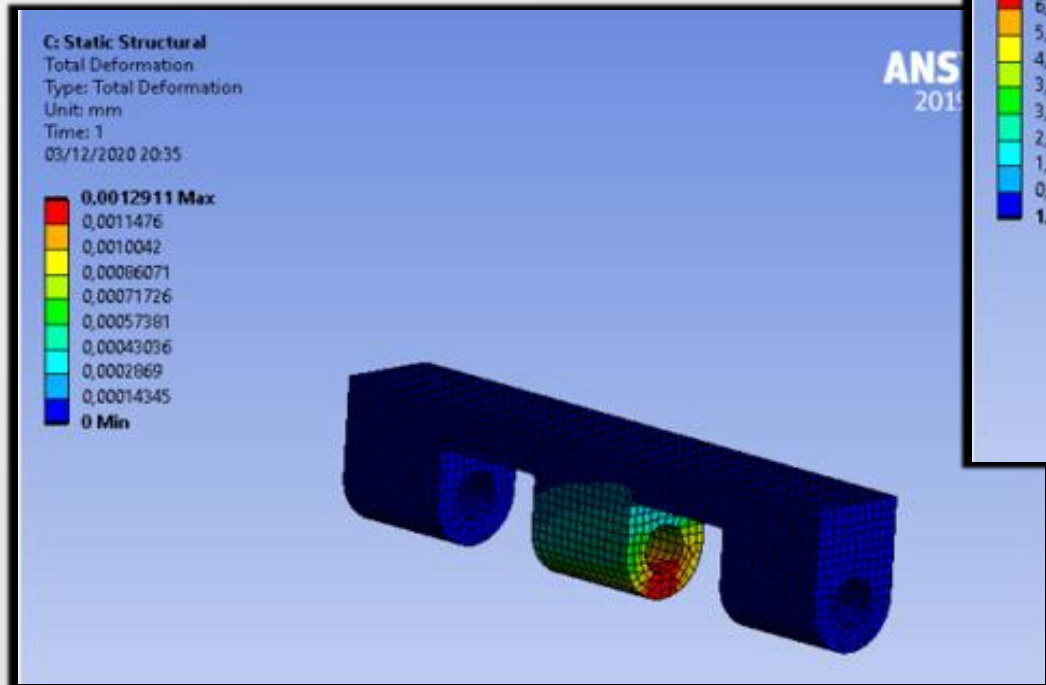
$$E\% = (896,34 - 615) / 615 = 46\%$$

$$C.S = \frac{1000}{896,34} = 1,11$$





Simulação Estrutural: Parâmetros e condições de contorno





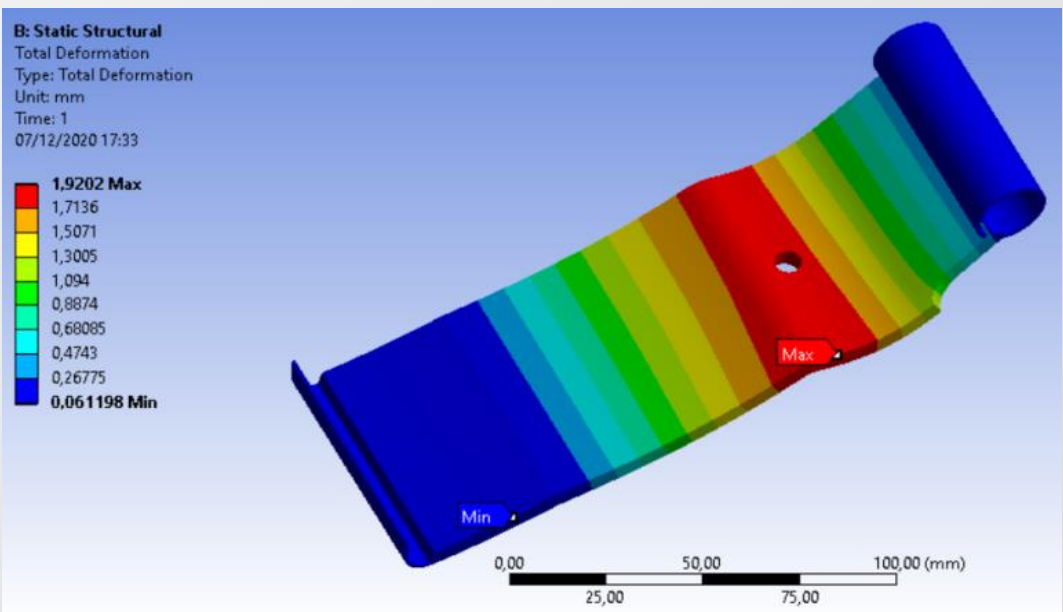
Simulações Estáticas Estruturais: Estudo dos pés

CS = 1,08

E
S
T
R
U
T
U
R
A

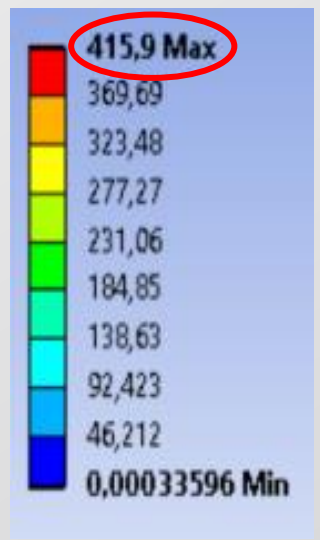
Condições de contorno:

- 6 camadas de Fibra de carbono
- 1 camada de Honeycomb sanduíche
- Espessura máxima de 5,2 mm
- Força aplicada de 690 N na face do furo das molas



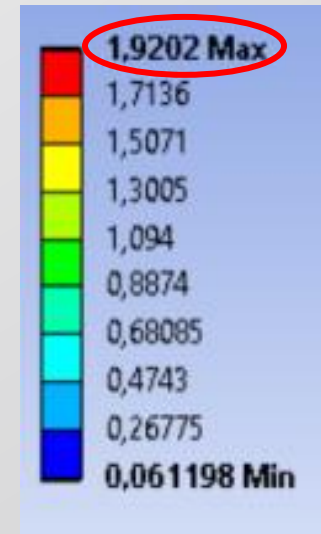
Tensões de Von-Misses

Tensões de Von-Misses [Mpa]



Tensão máx:
415,9 MPa

Deformações [mm]



Deformação máx:
1,92 mm

*Redução de 4 mm na espessura da base do pé após simulações



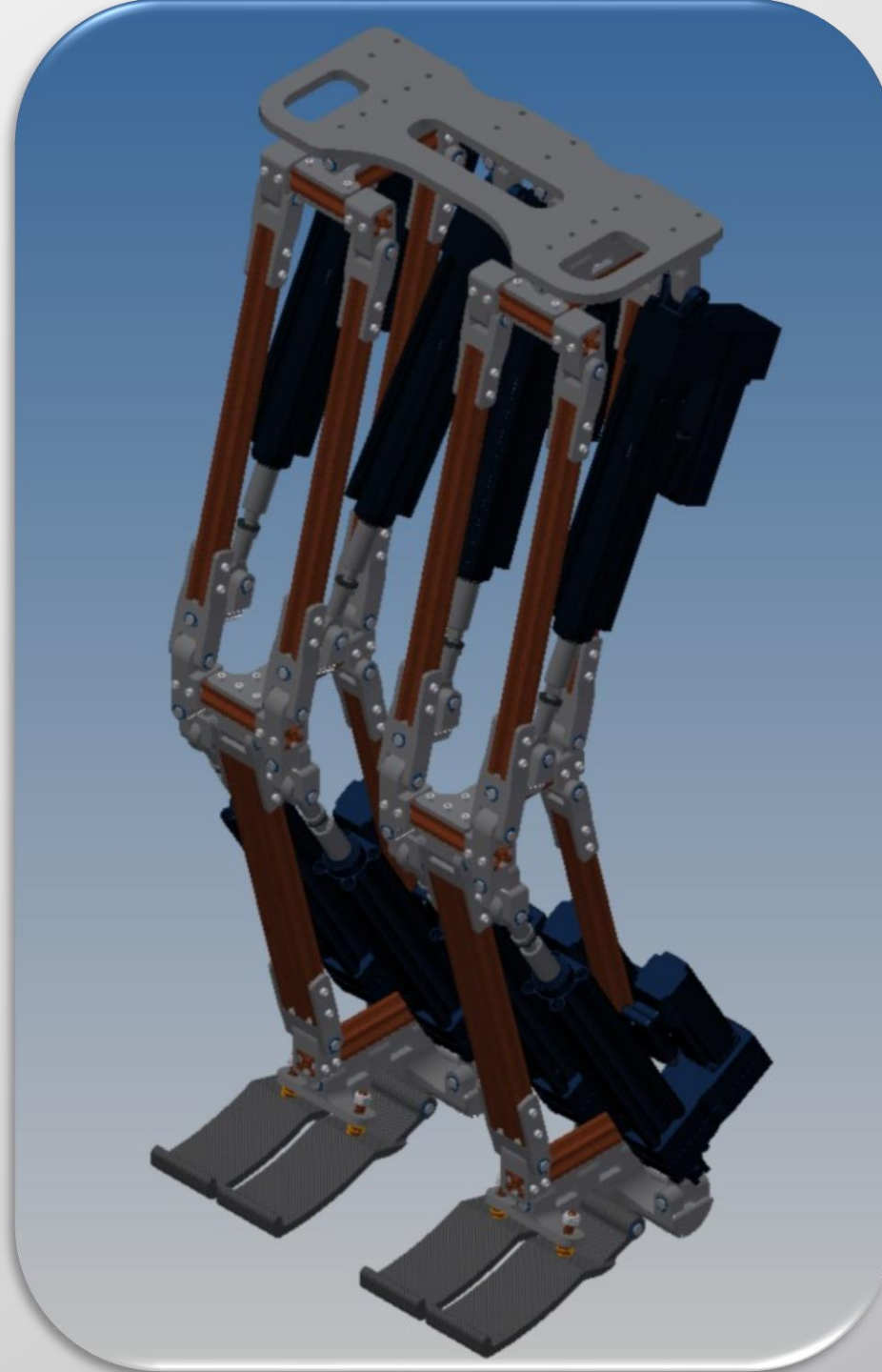
Custos e viabilidade do projeto

Item	Unidades	Custo/unidade	Custo parcial
Volume total de alumínio	2.213,2 cm ³	R\$ 0,22 / cm ³	R\$ 486,91
Componentes de laminação	Variado	R\$ Variado	R\$ 144,66
Perfil de alumínio V-slot	4,6 metros	R\$ 26,00 / metro	R\$ 119,60
Conjunto de atuadores	8 conjuntos	R\$ 14.763,00 / conjunto	R\$ 118.104,00
Usinagem em Eletroerosão	0,27 horas	R\$ 100,00 / hora	R\$ 27,00
Usinagem em Fresadora	1,31 horas	R\$ 100,00 / hora	R\$ 131,00
Impressão do molde do calc.	18 horas	R\$ 40,00 / hora	R\$ 720,00
Fundição do Calcanhar	386 cm ³	R\$ 0,22 / cm ³	R\$ 85,00
Usinagem em Jato da água	0,4 horas	R\$ 120,00	R\$ 48,00
Patrocínio FESTO + ROBOFEI			R\$ 118.104,00
Custos aplicados ao FEI 40			R\$ 1.700,17
TOTAL FINAL			R\$ 119.866,17



Conclusão

- *MODELAGEM MECÂNICA VIRTUAL;*
- *DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS ESTRUTURAIS VIÁVEIS;*
- *ESTIMATIVA DOS ESFORÇOS E SELEÇÃO DOS ATUADORES;*
- *DESENVOLVIMENTO DA CADEIA CINEMÁTICA DO SISTEMA;*
- *SIMULAÇÕES ESTRUTURAIS COMPUTACIONAIS;*
- *SIMULAÇÕES DE MARCHA DO PROTÓTIPO;*
- *CÁLCULOS E ESTIMATIVA DE CUSTOS.*





Agradecimentos

Professor orientador:

- Professor André Mendes – PhD em Engenharia de Automação e Controle (Dept. Eng. Mecânica)

Professores da disciplina de TCC:

- Professor Marcelo dos Santos – PhD em Engenharia Mecânica (Dept. Eng. Mecânica)
- Professor Arnaldo Forgas – PhD em Engenharia Mecânica (Dept. Eng. Mecânica)

Professores Co-orientadores:

- Professor Gustavo Donato – PhD em Engenharia Mecânica (Reitor)
- Professor Reinaldo Bianchi - PhD em Engenharia Elétrica (Dept. Eng. Elétrica)
- Professor Marko Ackerman - PhD em Engenharia Mecânica (Coordenador Dept. Eng. Mecânica)
- Professor Isaac Jesus da Silva – PhD em Engenharia Elétrica (Dept. Eng. Elétrica)

Patrocinadores:

- FESTO Brasil Ltda
- Projeto RoboFEI



Integrantes do grupo

Orientador do projeto:

- Prof. Dr. André de Souza Mendes

Integrantes:

- Fabio Yoiti Matsuda 11.116.833-2
- Giovanna Pedroso Coelho 11.116.308-5
- Gustavo Molina Matos 11.116.224-4
- Hugo Barreto Quelhas 11.116.900-9
- Julio Cesar P. Barbosa 11.116.948-8
- Rafael Dias Favero 11.116.208-7
- Vitor Alves da Cruz 12.120.077-8
- William Yassuhiro Yaguiiu 11.116.297-0