



## CONCEPÇÃO DE UMA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVEL COM SISTEMA DE AMORTECIMENTO

Bernardo Daher Gomes Barboza

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheira.

Orientador: Vitor Ferreira Romano

Rio de Janeiro

Setembro de 2017

CONCEPÇÃO DE UMA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVEL COM SISTEMA DE  
AMORTECIMENTO

Bernardo Daher Gomes Barboza

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO  
DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
ENGENHEIRA MECÂNICA.

---

Prof. Vitor Ferreira Romano, Dott. Ric. (Orientador)

---

Prof. Armando Carlos de Pina Filho, D. Sc.

---

Prof. Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto, Dr.Ing.

Rio de Janeiro

Setembro de 2017

Barboza, Bernardo Daher Gomes

Projeto de uma plataforma robótica móvel com sistema de amortecimento - Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2016.

XII, 97 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Vitor Ferreira Romano

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia Mecânica, 2016.

Referências bibliográficas: p. 83-84.

1. Introdução 2. Robótica. 3. Plataforma. 4. Dimensionamento. 5. Seleção dos componentes 6. Cálculos 7. Desenho Técnico. 8 Conclusões. 9 Bibliografias I. Romano, Vitor Ferreira. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Engenharia Mecânica. III. Projeto de uma plataforma robótica móvel com sistema de amortecimento.

*“Só fazemos melhor aquilo que repetidamente insistimos em melhorar. A busca pela  
excelência não deve ser um objetivo, e sim um hábito”*

*Aristóteles*

## DEDICATÓRIA

*Dedico o presente trabalho aos meus familiares e amigos que sempre me apoiaram. Nesta instituição pude aprender muito como pessoa e como profissional. Portanto, gostaria de dedicar à instituição UFRJ e todo o seu corpo docente.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me dado forças e sabedoria para conquistar tudo o que conquistei. Agradeço aos meus pais Ignácio Luiz Vilela Barboza e Doralice Gomes por investirem na minha educação e me darem todo amor e carinho, assim como meus irmãos Pedro Henrique Gomes Barboza e Arthur Daher Gomes Barboza por serem duas pessoas especiais na minha vida.

Agradeço também ao meu padrasto Luiz Henrique Rodrigues dos Santos por ser uma pessoa que eu possa contar a qualquer momento, e minha namorada Luany Barbosa de Souza Pereira por ser uma fonte de afeto e carinho mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço ao meu orientador Vitor Ferreira Romano pelo tema sugerido, pela orientação, a confiança depositada em mim e os conhecimentos passados ao longo de todo o curso.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

## CONCEPÇÃO DE UMA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVEL COM SISTEMA DE AMORTECIMENTO

Bernardo Daher Gomes Barboza

Setembro/2017

Orientador: Vitor Ferreira Romano

Curso: Engenharia Mecânica

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um robô capaz de desbravar e fazer o reconhecimento de um ambiente a ser explorado. O controlador receberá imagens em tempo real do local onde o robô foi lançado e poderá guiá-lo através de controle remoto. Neste projeto foram abordadas as etapas de modelagem, dimensionamento, seleção de componentes, e integração de partes, visando à validação do projeto. O foco no desenvolvimento deste projeto foi na parte mecânica e o emprego de materiais comuns no ramo da engenharia mecânica, de forma a capacitar o protótipo a realizar as tarefas de amortecimento e deslocamento. O projeto foi dividido da seguinte forma: estudo de projetos semelhantes, modelagem, análise matemática e desenho técnico de cada peça. Foi utilizado o programa SolidWorks (CAE) para a modelagem e simulação do movimento dos mecanismos, foram elaborados algoritmos para dimensionamento de componentes mecânicos numa planilha Excel. A biblioteca de comandos do Arduino pode ser usada para receber os sinais da interface de comando e processar os dados para gerar os torques e velocidades nos motores das rodas (essa parte não foi abordada).

Palavras-chave: Robô, Amortecimento, Desenho técnico, Modelagem.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Mechanical Engineer.

## CONCEPTION OF A MOBILE ROBOTIC PLATFORM WITH DAMPING SYSTEM

Bernardo Daher Gomes Barboza

Julho/2017

Advisor: Vitor Ferreira Romano

Course: Mechanical Engineering

This work has the objective to development a robot capable of exploring and recognizing an environment. The controller will receive real-time images of where the robot was launched and can guide it through remote control. In this project, the steps of modeling, sizing, component selection were approached to validate the project. The focus in the development of this project was on the mechanical part and the use of common material in the field of mechanical engineering, in order to enable the prototype to perform the damping and displacement tasks. The project was divided as follows: study of similar projects, modeling, mathematical analysis and technical drawing of each piece. SolidWorks program (CAE) was used for the modeling and simulation of the movement of the mechanisms, algorithms were designed for the sizing of mechanical components in an Excel worksheet. The Arduino command library can be used to receive signals from the command interface and process the data to generate the torques and speeds in the wheel motors (this part was not addressed).

Keywords: Robot, Cushioning, Technical drawing, modeling.



# Sumário

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Símbolos .....</b>	<b>xiv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação do Trabalho .....	1
1.2 Objetivos Gerais .....	1
1.3 Organização do Texto .....	2
<b>2 MARCAS IMPORTANTES DA ROBÓTICA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Aplicações da Robótica .....	4
2.2 Robôs Industriais .....	5
2.2.1 Robôs de coordenadas cartesianas/pórtico .....	7
2.2.2 Robôs de coordenadas cilíndricas .....	7
2.2.3 Robôs de coordenadas esféricas .....	8
2.2.4 Robô scara .....	8
2.2.6 Robô articulado ou antropomórfico .....	9
2.2.7 Robô paralelo .....	9
2.3 Robôs de serviço .....	10
<b>3 ANÁLISES DE PROJETOS SEMELHANTES.....</b>	<b>12</b>
1.1 Aspectos Gerais do Projeto .....	12
3.2 Equipamentos Semelhantes.....	16
3.2.1 DOGO .....	16
3.2.2 Throwbot XT .....	17
3.2.3 SandFlea.....	18
<b>4 PLATAFORMA MÓVEL COM SISTEMA DE AMORTECIMENTO .....</b>	<b>19</b>
4.1 Sequências de Funcionamento .....	19
4.1.1 Lançamento .....	19
4.1.2 Amortecimento.....	19

4.1.3	Elevação do sistema de amortecimento.....	20
4.1.4	Locomoção .....	20
4.1.5	Captação e transmissão de imagens .....	21
<b>5</b>	<b>PARTES DO ROBÔ .....</b>	<b>22</b>
5.1	Locomoção .....	22
5.2	Motores, Servos e Pneus .....	27
5.3	Conjunto Chassi .....	29
5.4	Molas.....	30
5.5	Amortecedores .....	34
5.6	Mecanismo do Gatilho .....	36
5.7	Mecanismo de Elevação.....	40
5.8	Unidade de Processamento - Arduino.....	41
5.9	Câmera .....	42
5.10	Unidade de Potência – Baterias.....	42
<b>6</b>	<b>ANÁLISE MATEMÁTICA DO SISTEMA DE AMORTECIMENTO .....</b>	<b>44</b>
6.1	Força de Atrito Máximo.....	44
6.2	Cálculo da Potência do Motor.....	46
6.3	Análise Matemática do Sistema de Amortecimento .....	48
6.3.1	Lançamento vertical em translação pura .....	48
6.3.2	Corpo rígido em queda livre com rotação .....	51
6.3.5	Modelagem do impacto sem rotação.....	55
6.3.6	Modelagem do impacto com rotação .....	56
6.4	Cálculo do Dimensionamento das Molas.....	57
6.5	Programa Excel .....	61
6.6	Outra Forma de Selecionar Molas.....	65
6.7	ANÁLISE DE CUSTOS .....	68
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>69</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>71</b>
<b>Anexo A – Catálogos .....</b>	<b>73</b>
<b>A.1 Molas de compressão .....</b>	<b>73</b>
<b>A.2 Metalon .....</b>	<b>79</b>
<b>Anexo B – Desenho Mecânico.....</b>	<b>80</b>
<b>Anexo C – Testes para Avaliação do Coeficiente de Restituição [24].....</b>	<b>82</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1 Robô industrial: manipulador mecânico, unidades de potência e controle.

Figura 2.2 Manipulador industrial de seis graus de liberdade

Figura 2.3 Robô de coordenadas cartesianas/pórtico

Figura 2.4 Robô de coordenadas cilíndricas

Figura 2.5 Robô de coordenadas esféricas

Figura 2.6 Robô Scara

Figura 2.7 Robô articulado ou antropomórfico

Figura 2.8 Robô paralelo

Figura 2.9 Robô autônomo cortador de grama

Figura 2.10 Robô autônomo aspirador

Figura 2.11 Cadeira de rodas

Figura 3.1 Esquema das etapas de funcionamento do robô.

Figura 3.2 Vista isométrica do protótipo com carenagem.

Figura 3.3 Vista principal do protótipo sem carenagem.

Figura 3.4 Vista lateral esquerda do protótipo sem carenagem

Figura 3.5 Vista superior do protótipo

Figura 3.6 Vista explodida do robô completo

Figura 3.7 Robô DOGO [5]

Figura 3.8 Throwbot XT com captação de áudio [6]

Figura 3.9 SandFlea [7]

Figura 4.1 Sistema de amortecimento com componentes detalhados

Figura 4.2 Robo antes de o elevador levantar o sistema de amortecimento

Figura 4.3 Robo depois de o elevador levantar o sistema de amortecimento

Figura 4.4 Imagem do chassi com as rodas e o terminal rotular

Figura 5.1 – Os quatro tipos de rodas utilizados em robôs móveis [9]

Figura 5.2 – Roda omnidirecional com configuração Swedish-45° [9]

Figura 5.3 – Rodas utilizadas no projeto

Figura 5.4 – Kit motor DC + roda [10]

Figura 5.5 – Kit motor DC + roda separados

Figura 5.6 – Servo motor [11]

Figura 5.7 – Conjunto chassi

Figura 5.8 – Gráfico de linearidade [12]

Figura 5.9 – Associação de molas em série

Figura 5.10 – Associação de molas em paralelo

Figura 5.11 – Molas do gatilho (amarelo)

Figura 5.12 – Molas do sistema de amortecimento

Figura 5.13 – Gráfico da deformação da mola indicando a pré-tensão. [13]

Figura 5.14 – Placas amortecedoras em EVA

Figura 5.15 – Sistema de gatilho armado (vermelho) + acionador (azul) + pino (amarelo)

Figura 5.16 – Sistema de gatilho armado (vermelho) + acionador (azul) + pino (amarelo)

Figura 5.17 – Vista superior do Sistema de gatilho armado (vermelho) + acionador (azul) + pino (amarelo)

Figura 5.18 – Vista superior do Sistema de gatilho desarmado (vermelho) + acionador (azul) + pino (amarelo)

Figura 5.19 – Fixação da mola no seu suporte/ Vista frontal e superior

Figura 5.20 – Pino de conexão do suporte da mola no elevador (esquerda) e gatilho (direita)

Figura 5.21 – Sistema de amortecimento (vermelho) + elevador (azul)

Figura 5.22 – Placa Arduino Uno [14]

Figura 5.23 Imagem da câmera utilizada [8]

Figura 5.24 Bateria 5000mAh Elite NiMh [15]

Figura 5.25 Configuração customizada [15]

Figura 6.1. Localização considerada do centro de massa

Figura 6.2 - Forças numa partícula  $i$  de um corpo rígido  $C$  [20].

Figura 6.3 – Movimento retardado, lançamento para cima [21]

Figura 6.4 – Energia cinética e potencial gravitacional nos pontos de altura máxima e mínima

Figura 6.5 – Queda com translação e rotação

Figura 6.6 – Queda com translação e sem rotação

Figura 6.7 – Queda com rotação

Figura 6.8 – Programa para os cálculos referentes a mola

Figura 6.9 – Resultados obtidos para mola tipo 1

Figura 6.10 – Resultados obtidos para mola tipo 2

Figura 6.11 – Resultados obtidos para mola tipo 3

Figura 6.12 – Resultados obtidos para mola tipo 4

Figura 6.13 – Os 4 diferentes tipos de extremidade da mola [18]

Figura 6.14 – Coeficientes para o cálculo da tensão admissível da mola [18]

Figura 6.15– Diâmetros e propriedades de materiais [18]

Figura 6.16 – Dimensões encontradas no mercado [19]

Figura 6.17 – Gráfico para seleção de molas [13]

Figura 6.18 – Tabela para seleção de molas [13]

Figura C.1– Pedras utilizadas no teste

Figura C.2 – Tipos de solo utilizados no teste

Figura C.3 – Coeficiente de restituição x frequência

Figura C.4 – Coeficiente de restituição x peso da pedra

# Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Características gerais do robô.

Tabela 5.1 – Tabela retirada do livro “Atonomous Mobile Robots” [9]

Tabela 5.2. Informações do motor

Tabela 6.1– Propriedades Tribológicas [16]

Tabela 6.2 - Forças de atrito estático e cinético para os diferentes tipos de solo

# Lista de Símbolos

$F_{at}$	Força de atrito
$\mu$	Coeficiente de atrito
$N$	Força normal
$v_{linear}$	Velocidade linear
$\omega$	Velocidade angular
$R$	Raio
$\phi_{roda}$	Diâmetro da roda
$Pot$	Potência
$F$	Força
$RPM$	Rotação
$T$	Torque
$x$	Deslocamento linear
$\theta$	Deslocamento angular
$k$	Constante da mola
$v$	Velocidade linear
$\omega$	Velocidade angular
$m$	Massa
$h$	Altura
$P$	Capacidade da mola
$f$	Flecha
$d$	Diâmetro do fio da mola
$Pot_{m\acute{a}x}$	Potência máxima
$Pot_{m\acute{i}n}$	Potência mínima
$r$	Raio da mola
$K_a$	Fator de acabamento superficial
$K_b$	Fator de forma
$K_c$	Fator devido a curvatura (concentração de tensões)
$K_d$	Fator de temperatura
$K_e$	Fator de concentração de tensão
$K_f$	Fator de flexão



$K_w$	Fator KAHL
$K_s$	Fator devido ao esforço cortante
$\sigma_{\bar{n}}$	Limite de resistência a fadiga
$G$	Propriedade do material
$\tau_r$	Limite de resistência ao cisalhamento
$l$	Comprimento da mola
$n$	Número de espiras
$N_a$	Número de espiras ativas
$N_t$	Número de espiras total
$p$	Passo com a mola carregada
$A$	Área
$c$	Curvatura da mola
$S_{ut}$	Tensão admissível
$S_y$	Limite de escoamento devido a tração
$Ss_y$	Limite de escoamento devido ao cisalhamento
$Cs_{sse}$	Fadiga em vida infinita
$F_{m\acute{a}x}$	Força máxima
$F_{m\acute{i}n}$	Força mínima
$L0$	Comprimento da mola livre
$L1$	Comprimento da mola comprimida
$M_F^{CM}$	Momento resultante em relação ao centro de massa do carro
$I_c$	Momento de inércia

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 Motivação do Trabalho**

Este trabalho tem como motivação o desenvolvimento de um projeto de uma plataforma robótica móvel dotada de câmeras, que possa ser utilizada como equipamento de apoio ao operador humano para inspeção em ambientes de difícil acesso, ou mesmo realizar ações de reconhecimento e espionagem em regiões de conflito.

A concepção proposta é original pelo fato de apresentar um sistema de absorção de impacto onde as partes sensíveis se encontram protegidas no momento do impacto com o solo e, através de um mecanismo apropriado, tem-se o desacoplamento entre a parte de locomoção e a de amortecimento, permitindo dessa forma que o equipamento possa se deslocar e transmitir imagens em tempo real.

## **1.2 Objetivos Gerais**

Essencialmente neste projeto foram abordadas as etapas de concepção, modelagem, simulação, dimensionamento e seleção de componentes, bem como os principais desenhos de fabricação de peças, visando à validação do projeto. O foco no desenvolvimento deste projeto foi na parte mecânica e o emprego de materiais e componentes disponíveis no mercado nacional de forma a tornar viável a concepção da plataforma para a realização das diversas tarefas a serem desempenhadas pelo equipamento.

O robô móvel de reconhecimento, dotado de câmera e sistema de transmissão de dados, é um equipamento portátil e controlado por um operador humano através de uma interface, que deverá ser manualmente arremessado a uma altura de até 3 metros nas proximidades do local a ser explorado. O mesmo deve ser capaz de amortecer o impacto da queda através do seu sistema de amortecimento evitando que seus componentes internos e as rodas sejam danificados. Após estabilizada a posição de repouso, o equipamento realiza o desacoplamento do sistema de amortecimento do sistema de movimentação, permitindo que as rodas toquem o solo, para que em seguida a etapa de movimentação no solo possa ser executada. Por fim, o equipamento estará apto a captar e enviar imagens do ambiente em questão para o operador em tempo real, através das câmeras instaladas em seu chassi.

### **1.3 Organização do Texto**

Este primeiro capítulo apresenta o escopo deste projeto final assim como a motivação para a sua realização, seus objetivos a serem alcançados e como a monografia foi organizada.

O capítulo dois apresenta um breve resumo do universo da robótica abordando pontos marcantes neste assunto. Este capítulo mostra as diferentes áreas de atuação da robótica e exemplifica as que mais se assemelham a forma de atuação do protótipo apresentado neste projeto final.

O terceiro capítulo apresenta de maneira geral a sequência de funcionamento do protótipo, apresenta e destacar suas principais peças. Neste capítulo são citados os robôs existentes no mercado que mais se aproximam com os objetivos almejados neste projeto.

O quarto capítulo explica detalhadamente as etapas de funcionamento do robô, além de ilustrar e identificar o componente responsável por realizar a tarefa em questão.

O quinto capítulo aborda diversos componentes comumente utilizados em robôs mecânicos, acompanhado de uma breve explicação de cada um deles no funcionamento da plataforma móvel em questão.

O sexto capítulo aborda os cálculos matemáticos para o dimensionamento e seleção dos componentes a serem utilizados, citados no capítulo anterior. Além da análise de custo das peças e elementos mecânicos selecionados.

O sétimo capítulo contém a conclusão, a bibliografia utilizada como referência, os desenhos técnicos de todas as peças a serem fabricadas junto com os desenhos de conjunto, além dos catálogos e anexos.

## **2 MARCAS IMPORTANTES DA ROBÓTICA**

Os primeiros relatos de máquinas automatizadas foram na idade média, na Europa e no Oriente médio. Os textos escritos por Al-Jazari descreviam máquinas automatizadas como partes de relógios, dispositivos mecânicos, um grande relógio mecânico que soava na hora determinada, uma banda de robô musical e uma garçonete robótica que servia bebidas.

Inicialmente muitos robôs eram inspirados em animais e figuras humanoides como simples sistemas de pesos e bombas pneumáticas. Mas foi no século XVIII que a robótica teve avanços mais significativos devido à expansão dos conhecimentos em mecânica e a criação de novas peças, visando automatizar as operações na indústria têxtil.

Em 1738, foi criado o primeiro robô funcional por Jacques de Vaucanson, era um androide que tocava flauta. Porém segundo as definições modernas, muitos consideram que o primeiro robô foi um barco teleoperado inventado por Nikola Tesla, em 1898. Portanto não se pode apontar qual foi o primeiro robô a ter sido criado de fato, pois sua definição é muito abrangente.

O desenvolvimento de máquinas a vapor e motores mais potentes possibilitaram que a indústria tornasse a linha de produção mais rápida e eficiente, aumentando a carga de trabalho e a quantidade de produtos. Dessa forma a utilização desse tipo de maquinário se tornou imprescindível em qualquer ramo industrial.

A criação do computador em 1940, e dos sucessivos aperfeiçoamentos das partes que o constituem, permitiu a criação de robôs controlados por códigos. O primeiro robô industrial, comercial e programável foi no final da década de 50 desenvolvido por George Devol e Joe Engleberger.[1]

Atualmente vivemos a quinta geração da robótica, em que as pesquisas estão direcionadas para a área de inteligência artificial, esse tipo de tecnologia permite que os robôs possuam sentidos e expressem emoções. Não se pode determinar até onde a robótica pode chegar pois todos os dias novas pesquisas e descobertas estão sendo feitas no mundo todo.

## 2.1 Aplicações da Robótica

As áreas de atuação da robótica são tão vastas quanto as tarefas que um ser humano pode realizar, em [2] é apresentada uma divisão delas com o objetivo de estabelecer uma classificação do equipamento baseado em sua área de atuação. A seguir está mencionada tal divisão:

- **Movimentação:** movimentação de peças entre posições definidas, carregamento e descarregamento de peças em magazines, carregamento e descarregamento de peças em máquinas operatrizes, paletização;
- **Soldagem e Usinagem:** O robô tem a função de soldagem e usinagem, são robustos, trabalhando de forma uniforme e preciso. Esta aplicação é a mais comum na indústria automotiva;
- **Pintura:** É bem usual na indústria automotiva. A pintura robotizada elimina o contato do operador humano com substâncias contaminantes.
- **Inspeção:** Inspeção de peças, placas de circuitos, e outros produtos similares, sistema de visão de raio-X dentre outros equipamentos.
- **Montagem:** Na robótica a montagem é uma das tarefas mais complexas, porque envolve mais de uma peça e conseqüentemente muitas operações. As peças, por exemplo, são identificadas e localizadas em uma determinada ordem para assim serem instaladas e bem ajustadas no conjunto. Montagem envolve operações de empurrar, girar, equilibrar. Outro fator importante é o dimensionamento das peças, onde qualquer variação pode inviabilizar a montagem de todo o conjunto;
- **Vigilância:** a vigilância tem sido largamente utilizada na indústria, um exemplo seria no controle de tráfego, ou câmeras de vigilância para detectar as placas dos carros, com alta velocidade.
- **Medicina:** Um exemplo usado na medicina é o Robodoc que foi projetado para ajudar nas operações de um cirurgião o substituindo. Uma função por ele executada é, por exemplo, a furação do crânio com a dimensão e precisão exata, além disso, a orientação e a forma do osso pode ser determinada por Tomografia Computadorizada e transferida para o controlador do robô, que direciona os movimentos para melhor ajuste. “O robô chamado da Vinci Surgical Robot, que é aprovado pelos EUA Food and Drug Administration (FDA), foi utilizado para realizar a cirurgia abdominal”.

- Pessoas com deficiência: Um estudo foi realizado com um pequeno robô de mesa para se comunicar com pessoas deficientes e executar tarefas como colocar comida no microondas e entregar para a pessoa comer, entre outras funções.
- Ambientes perigosos: Os robos são criados e adaptados para sobreviverem em ambientes de risco para a vida humana. Por exemplo, em ambientes com elevados níveis de temperatura, radiação, e etc.
- Missões em ambientes hostis: Robôs são usados para exploração de lugares, planetas e até explorações subaquáticas.

## 2.2 Robôs Industriais

Um robô industrial é uma máquina manipuladora, com varios graus de liberdade, controlada automaticamente, reprogramável multifuncional, que pode ter a base fixa ou móvel, para utilização em aplicações de automação industrial [3]. Um robô industrial é formado pela integração do manipulador mecânico, unidade de comando e unidade de potência como ilustrado na figura 2.1.

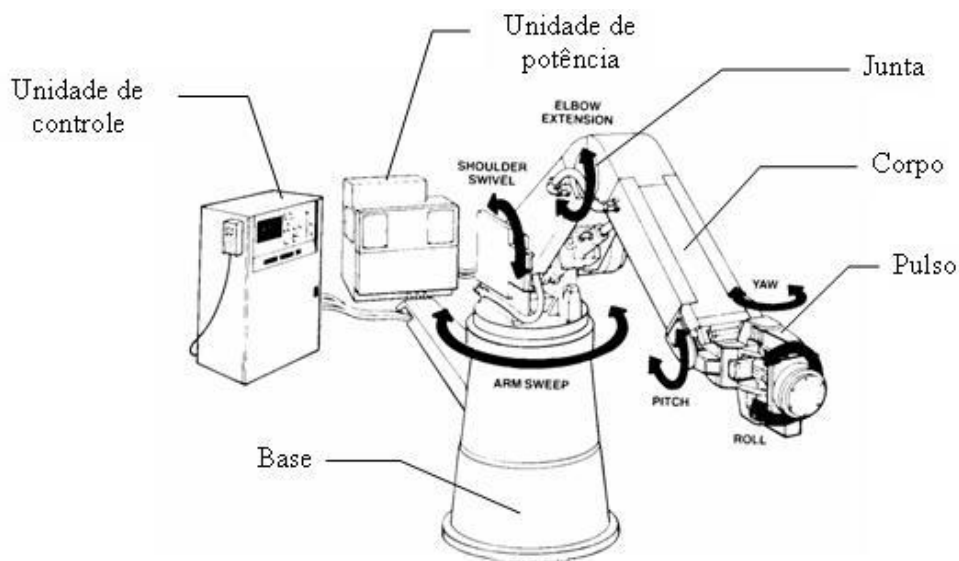


Figura 2.1: Robô industrial: manipulador mecânico, unidades de potência e controle.

- a) Manipulador mecânico: Refere-se principalmente ao aspecto mecânico e estrutural do robô. Consiste da combinação de elementos estruturais rígidos (corpos ou elos) conectados entre si através de articulações (juntas), sendo o primeiro corpo denominado base e o último extremidade terminal, onde será vinculado o componente efetuator (garra ou ferramenta). Seus principais componentes estão listados abaixo e ilustrados na figura 2.2.

- **Base:** Pode ser fixa no chão de fábrica ou em um suporte.
- **Elos:** Corpos rígidos que formam a cadeia cinemática.
- **Juntas:** Vinculam os elos na cadeia cinemática.
- **Efetuator final:** É o elemento de ligação entre o robô e o meio que o cerca. Pode ser do tipo garra ou ferramenta.
- **Atuadores:** Motores elétricos, hidráulicos ou pneumáticos.
- **Sensores:** Encoders, Lasers, Câmeras etc.

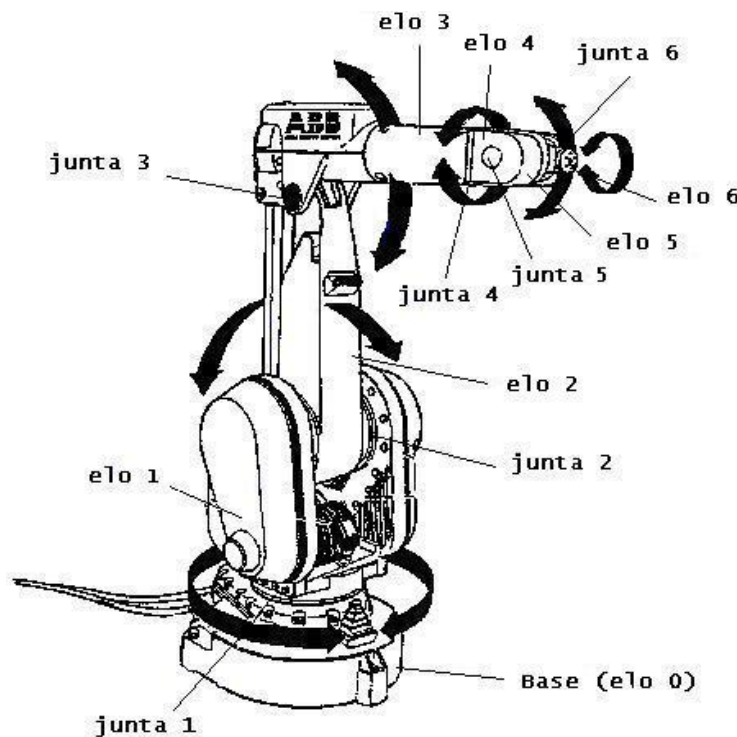


Figura 2.2: Manipulador industrial de seis graus de liberdade.

- Unidade de comando: Responsável pelo gerenciamento e monitoração dos parâmetros operacionais requeridos para realizar as tarefas do robô.
- Unidade de potência: Responsável pelo fornecimento de potência necessária à movimentação dos atuadores.

A versatilidade do robô está diretamente ligada ao número de movimentos individuais das articulações (graus de liberdade) que o manipulador mecânico apresenta.

É possível encontrar diversos tipos de classificações para este tipo de maquinário, visto que existem diversos tipos de elementos (juntas e elos) podendo ser combinados

de diversas formas diferentes. A seguir estão listados as principais configurações relativas à estrutura mecânica.

- Robô de coordenadas cartesianas/Pórtico
- Robô de coordenadas cilíndricas
- Robô de coordenadas esféricas
- Robô Scara
- Robô articulado ou Antropomórfico
- Robô paralelo

### 2.2.1 Robôs de coordenadas cartesianas/pórtico

Possui três juntas prismáticas (PPP), resultando em um movimento composto por três translações, cujos eixos de movimento são coincidentes com um sistema de coordenadas de referência cartesiano. Uma variante deste tipo de robô é a configuração tipo Pórtico. O volume de trabalho gerado está ilustrado na figura 2.3 em formato de paralelepípedo.

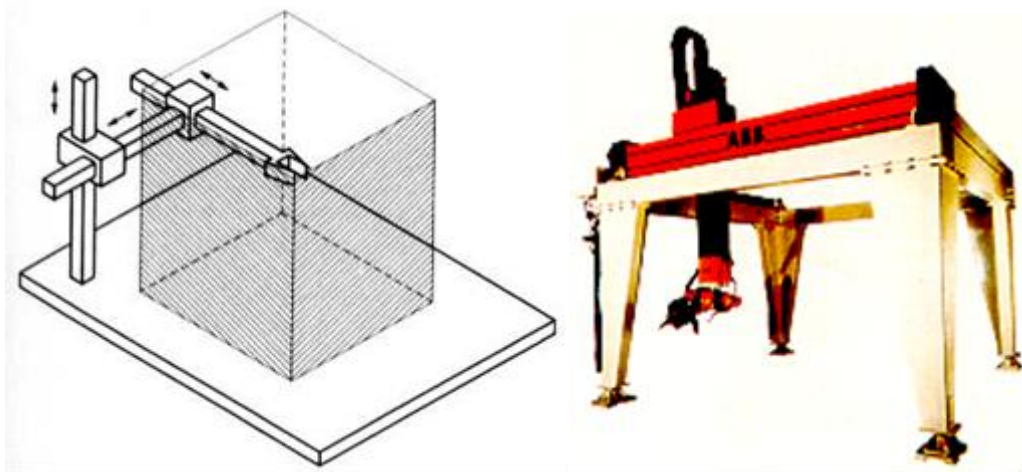


Figura 2.3 Robô de coordenadas cartesianas/pórtico

### 2.2.2 Robôs de coordenadas cilíndricas

Nesta configuração, os eixos de movimento podem ser descritos no sistema de coordenadas de referência cilíndrica. É formado por duas juntas prismáticas e uma de revolução (PPR), compondo movimentos de duas translações e uma rotação. O volume de trabalho gerado é cilíndrico e pode ser observado na figura 2.4.



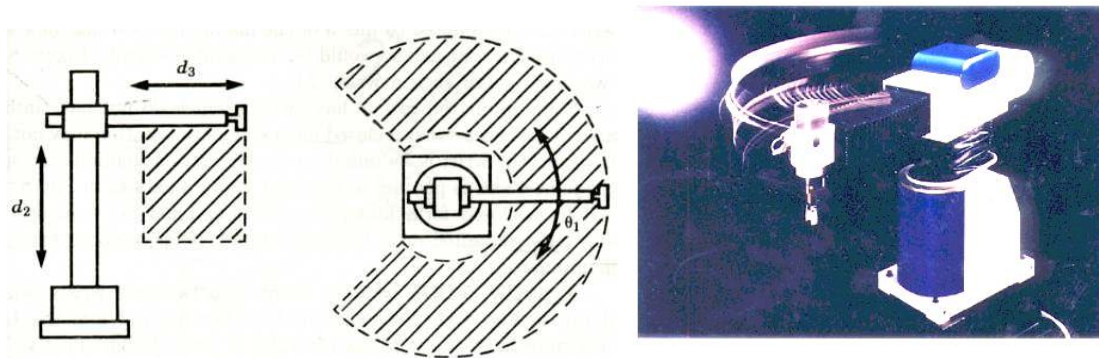


Figura 2.4 Robô de coordenadas cilíndricas

### 2.2.3 Robôs de coordenadas esféricas

Nesta configuração, os eixos de movimento formam um sistema de coordenadas de referência polar, através de uma junta prismática e duas de rotação (PRR), compondo movimentos de uma translação e duas rotações. O volume de trabalho gerado é aproximadamente esférico e pode ser observado na figura 2.5.

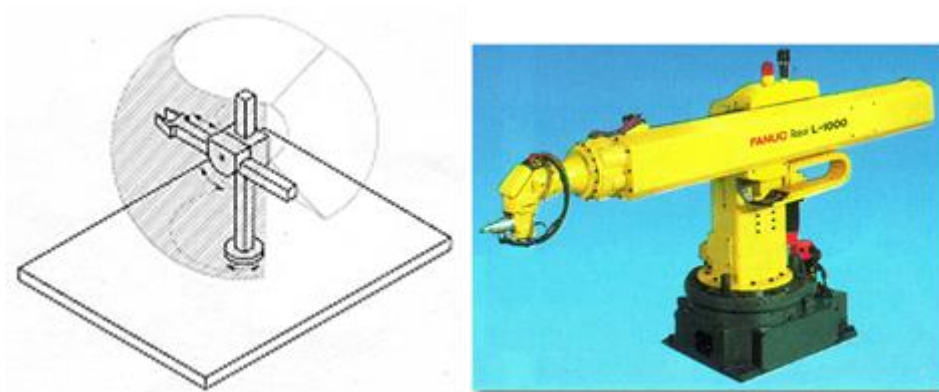


Figura 2.5 Robô de coordenadas esféricas

### 2.2.4 Robô scara

Nesta configuração, o robô apresenta duas juntas de rotação dispostas em paralelo, para se obter movimento num plano, e uma junta prismática, perpendicular a este plano (PRR), apresentando portanto uma translação e duas rotações. É empregado geralmente em tarefas de montagem automatizada. O volume de trabalho é aproximadamente cilíndrico e pode ser observado na figura 2.6.

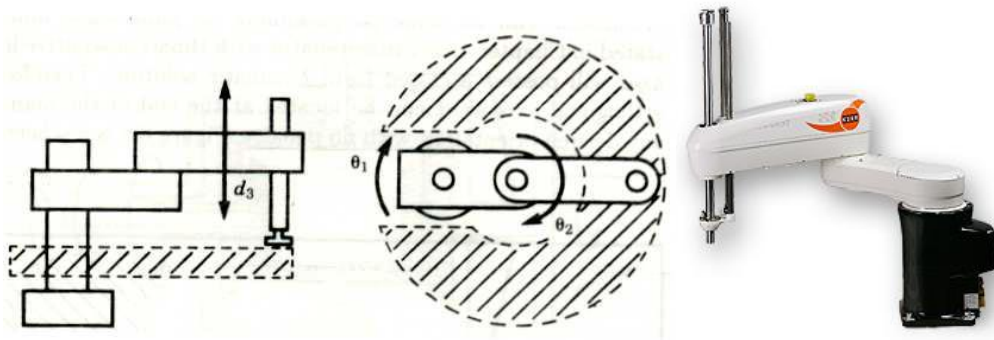


Figura 2.6 Robô Scara

### 2.2.6 Robô articulado ou antropomórfico

Nesta configuração, existem pelo menos três juntas de rotação (RRR). O eixo de movimento da junta de rotação da base é ortogonal às outras duas juntas de rotação, que são simétricas entre si. Tal configuração é a que permite maior mobilidade aos robôs um exemplo deste de robô articulado está ilustrado na figura 2.7. O volume de trabalho apresenta uma geometria mais complexa em relação às outras.



Figura 2.7 Robô articulado ou antropomórfico

### 2.2.7 Robô paralelo

Apresenta configuração tipo plataforma e mecanismos em forma de cadeia cinemática fechada. Possui três juntas prismáticas (PPP) ou três juntas de rotação (RRR) um exemplo deste tipo de robô está ilustrado na figura 2.8. O volume de trabalho é aproximadamente esférico.



Figura 2.8 Robô paralelo

### 2.3 Robôs de serviço

Robôs de serviço são aqueles que desempenham atividades mais caseiras, não industriais. Este tipo de maquinário tem se tornado cada dia mais comum no dia-a-dia do ser humano pois auxiliam na execução de diversos tipos de atividades, como por exemplo cortar a grama figura 2.9, limpar a casa (aspirador de pó) figura 2.10, locomoção de pessoas deficientes (cadeira de rodas) figura 2.11. [4]



Figura 2.9 Robô autônomo cortador de grama



Figura 2.10 Robô autônomo aspirador



Figura 2.11 Cadeira de rodas

Devido a grande quantidade de divisões e a existência de robôs cada vez mais qualificados, vale ressaltar que um robô pode se enquadrar em mais de uma classificação dependendo das funções que o mesmo possuir. No caso do protótipo apresentado neste projeto, ele se enquadraria como robô de serviço [4].

### 3 ANÁLISES DE PROJETOS SEMELHANTES

#### 1.1 Aspectos Gerais do Projeto

O trabalho de conclusão de curso tem como ideia geral a realização da concepção do projeto e a modelagem de um robô que seja operado através de controle remoto (sistema telerrobotizado), que deva ser capaz de explorar distintos ambientes e enviar para o seu operador as informações por ele captadas. Para sua utilização são necessárias cinco etapas: lançamento por ação humana, amortecimento ao impacto devido a queda livre, elevação do sistema de amortecimento, locomoção e transmissão de imagens, essas etapas serão detalhadas no capítulo 4.

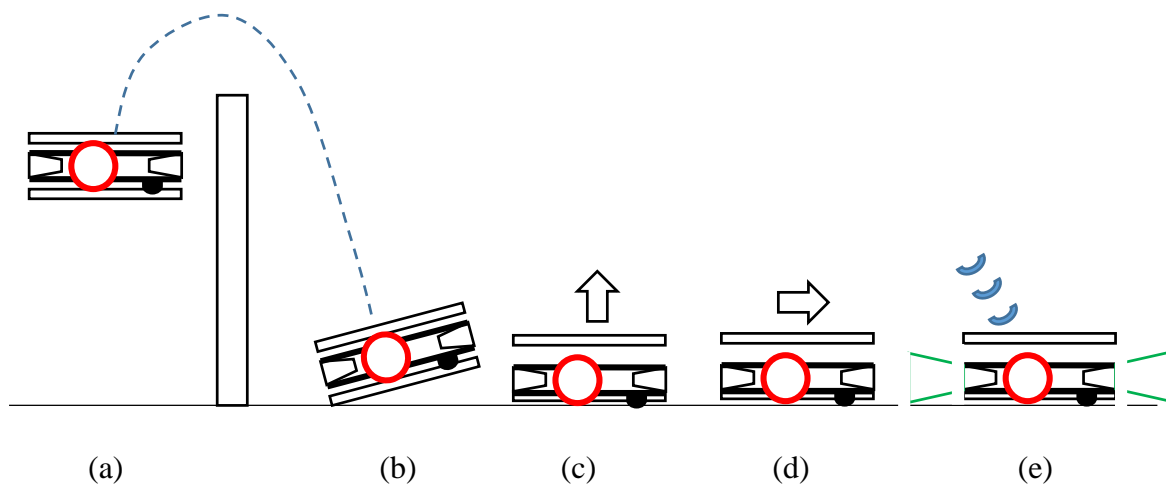


Figura 3.1 Esquemas das etapas de funcionamento do robô: (a) lançamento por ação humana, (b) amortecimento ao impacto devido a queda livre, (c) elevação do sistema de amortecimento, (d) locomoção e (e) transmissão de imagens.

As principais características dimensionais e especificações de componentes do protótipo do robô são indicadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 Características gerais do robô.

Item	Especificação
Dimensões gerais	Aberto: 88 x 227 x 230 mm Fechado: 49 x 227 x 230 mm
Massa	3,3 kg
Roda	2 rodas com Diâmetro 65 mm e espessura 25 mm
Motor	2 motores (6 VDC, 120rpm)
Redutor	2 redutores (48:1)
Servomotor	Futaba, 6V, 3kg/cm
Controlador	Atmel AVR de 8 bits modelo Arduino UNO
Transmissor wifi	ATmega328 integrado na placa do arduino
Baterias	5000mAh Elite NiMh, 12V

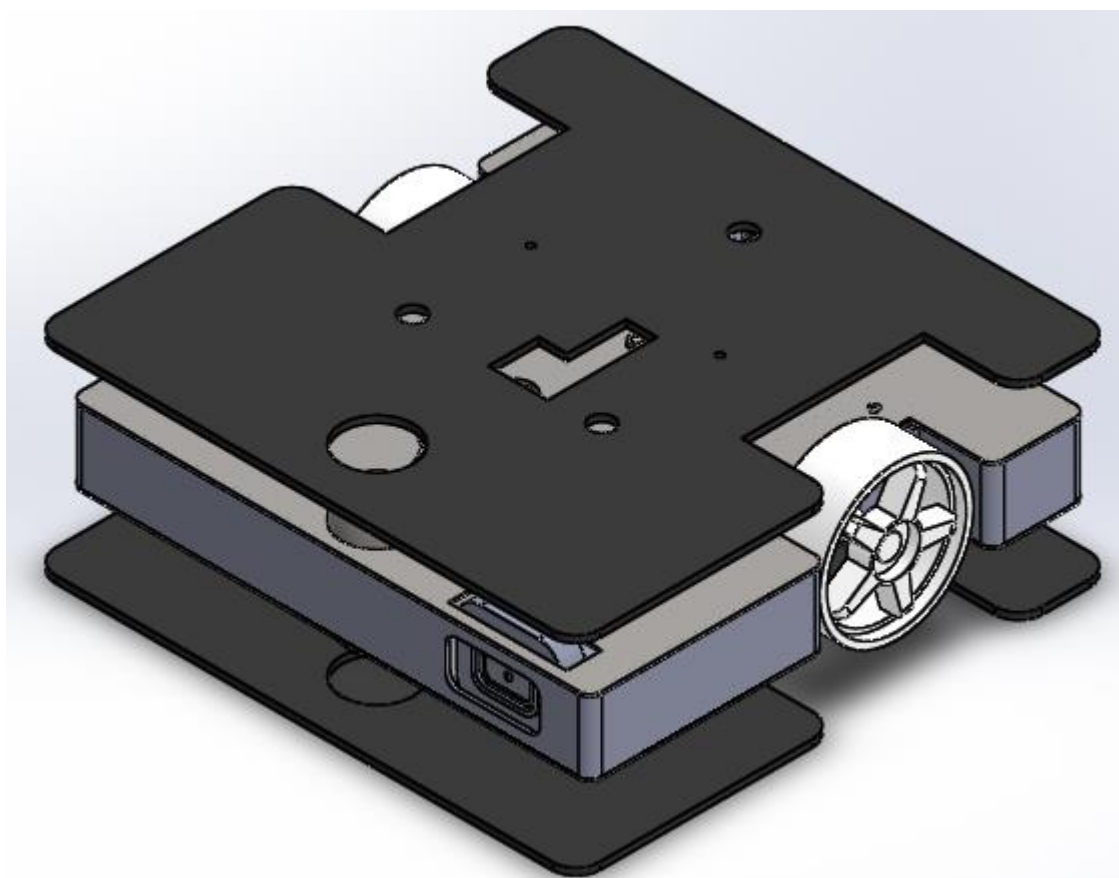


Figura 3.2 Vista isométrica do protótipo com carenagem.

Nas figuras 3.3 a 3.5 são apresentados os principais componentes do robô móvel como: câmera, unidade de programação (Arduíno), bateria, condutores elétricos e



transmissor de sinal *wifi*. A concepção foi desenvolvida através do programa SolidWorks, tendo por base as dimensões reais dos componentes comerciais.

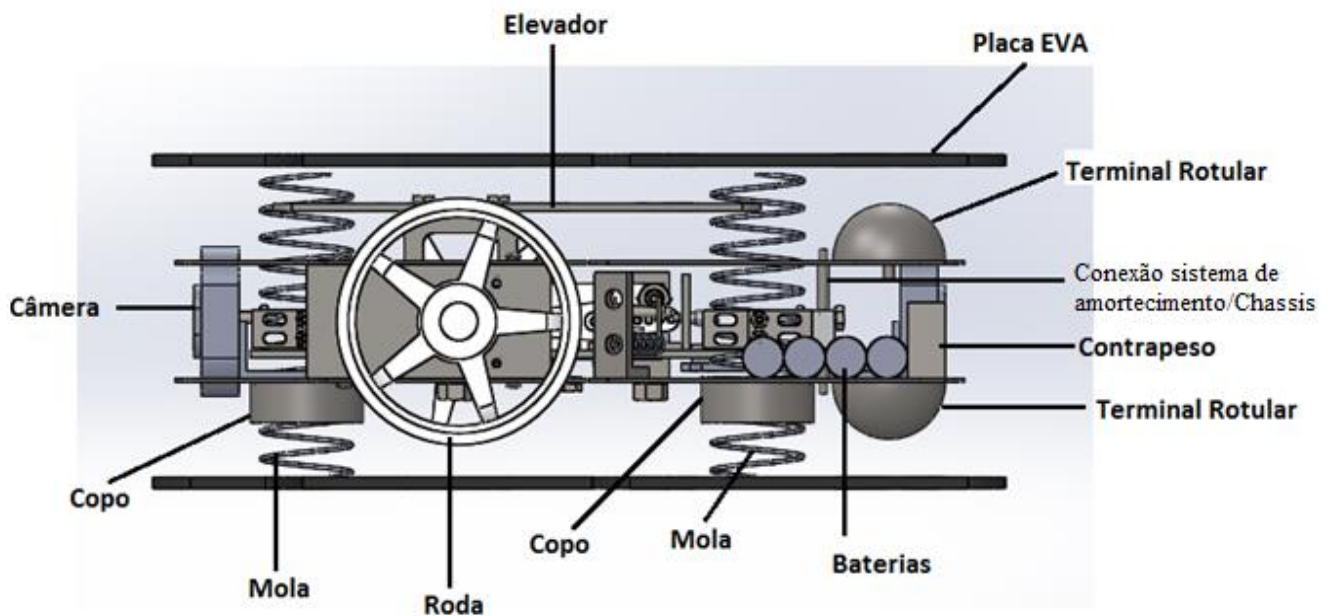


Figura 3.3 Vista principal do protótipo sem carenagem.

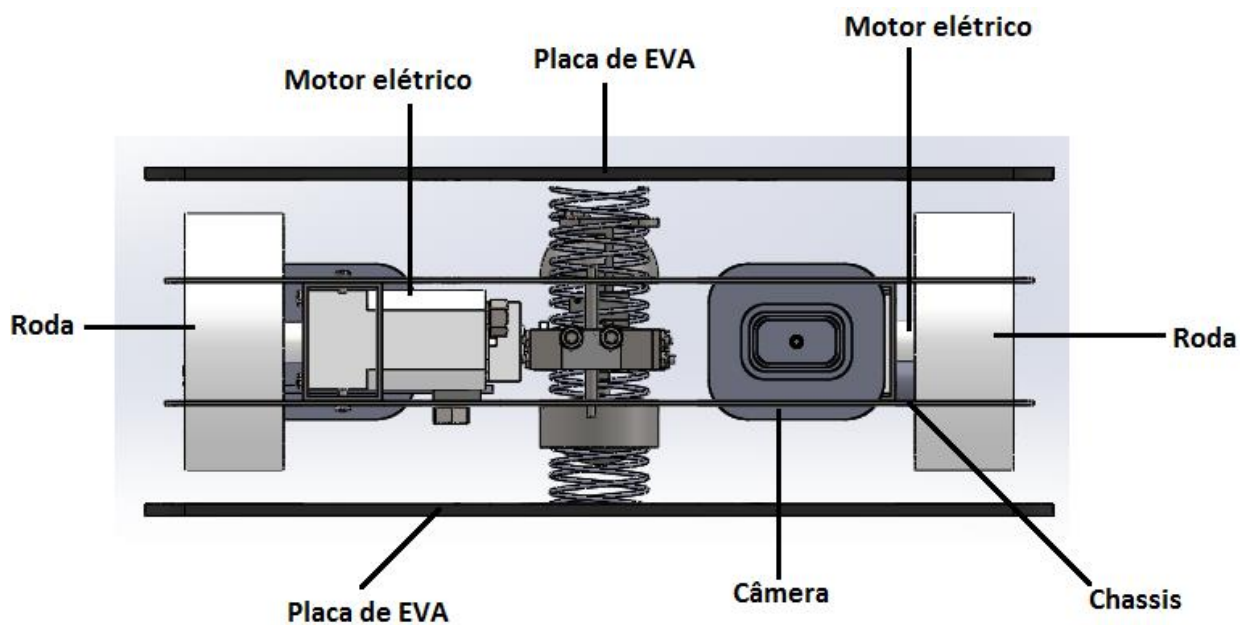


Figura 3.4 Vista lateral esquerda do protótipo sem carenagem.

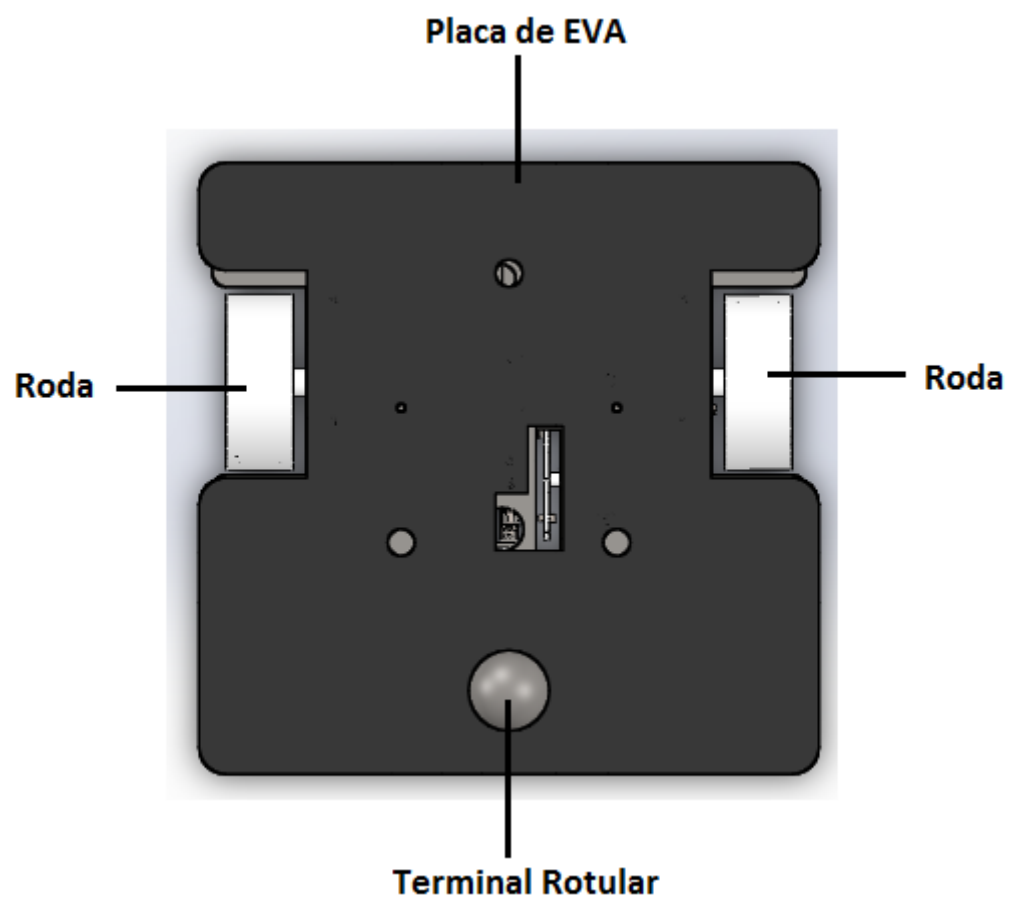


Figura 3.5 Vista superior do protótipo.



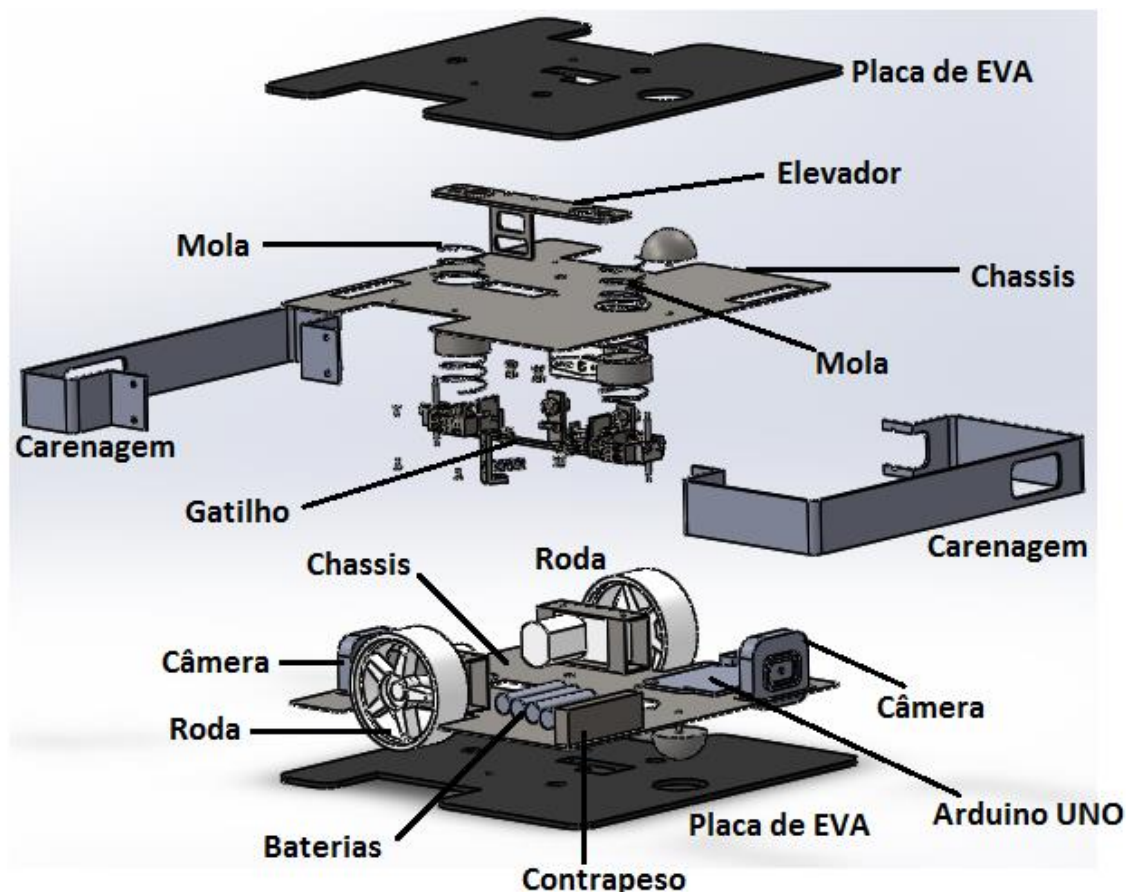


Figura 3.6 – Vista explodida do robo completo.

## 3.2 Equipamentos Semelhantes

### 3.2.1 DOGO

Inicialmente foram analisados alguns projetos semelhantes existentes no mercado, tal como o DOGO, figura 3.6, ele é um verdadeiro cão de vigilância em forma robótica. Este protótipo pode ser operado remotamente através de sua unidade de controle, e tem a capacidade de neutralizar inimigos com facilidade, pois ele é equipado com uma pistola Glock 9 mm. O DOGO é o principal robô da SWAT e times de operações especiais. Este protótipo conta também com arma não letal, simples designação do alvo ao atirar, marca laser visível no alvo, sistema de comunicação para negociação, oito câmeras, sendo cinco em tempo real [5].



Figura 3.7 Robô DOGO [5]

### 3.2.2 Throwbot XT

O Throwbot XT (figura 3.7) é a prova d'água e terra, ele é muito utilizado em operações táticas e possui as seguintes vantagens: Ser extremamente leve (540g), pode ser arremessado a uma distância horizontal de 36m, pode cair de uma altura vertical de 9m, é extremamente silencioso (emite 22 decibéis quando está em operação), possui uma câmera de infravermelho que é ativado automaticamente quando o ambiente possui pouca luminosidade permitindo que o operador tenha visão mesmo no escuro [6].



Figura 3.8 Throwbot XT com captação de áudio [6]

### 3.2.3 SandFlea

O robô desenvolvido pela BostonDynamics conhecido como SandFlea [7], figura 3.8, apresenta diversas características almejadas neste projeto. O SandFlea é totalmente simétrico, pesa apenas 4,9kg e consegue atingir uma altura de 8m com o seu sistema de propulsão. Vale ressaltar que o impacto da queda é todo absorvido pelas suas rodas personalizadas.

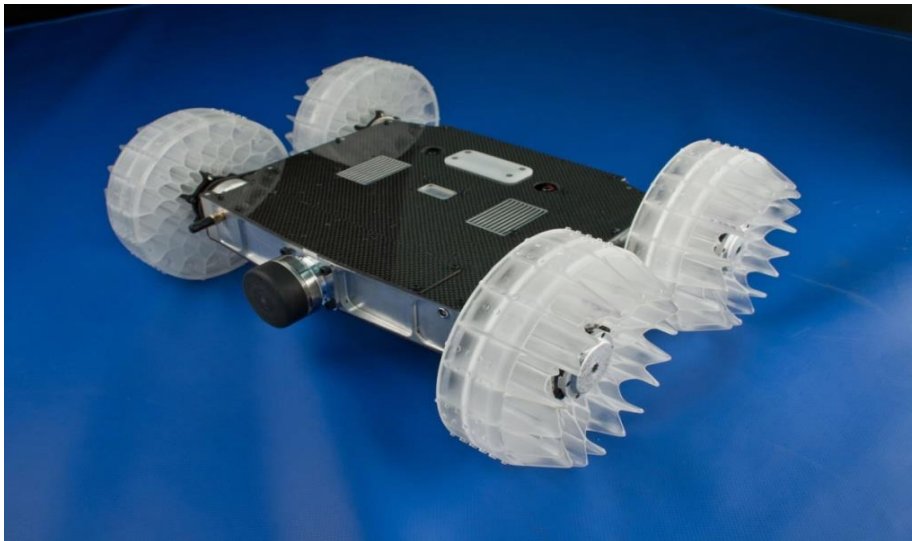


Figura 3.9 SandFlea [7]

## 4 PLATAFORMA MÓVEL COM SISTEMA DE AMORTECIMENTO

### 4.1 Sequências de Funcionamento

Para o funcionamento correto do protótipo se faz necessário percorrer as 5 etapas descritas a seguir.

#### 4.1.1 Lançamento

A primeira etapa consiste no lançamento do protótipo no local a ser reconhecido, para isso o operador deve arremessar a plataforma no local desejado. Nesta etapa o operador deve tomar alguns cuidados pois a má utilização pode danificar o funcionamento do protótipo, portanto se faz necessário evitar ultrapassar a altura limite imposta pelo sistema de amortecimento, locais com muita água acumulada, incêndios e locais com campo magnético muito forte.

#### 4.1.2 Amortecimento

O sistema de amortecimento ficará responsável por absorver o impacto da queda do protótipo, transformando energia potencial gravitacional e energia cinética em energia elástica. O principal objetivo desta etapa é evitar que peças sejam danificadas e garantir que a plataforma móvel aterrisse no solo da melhor forma possível. Na figura 4.1, estão detalhados os componentes responsáveis por executar esta tarefa.

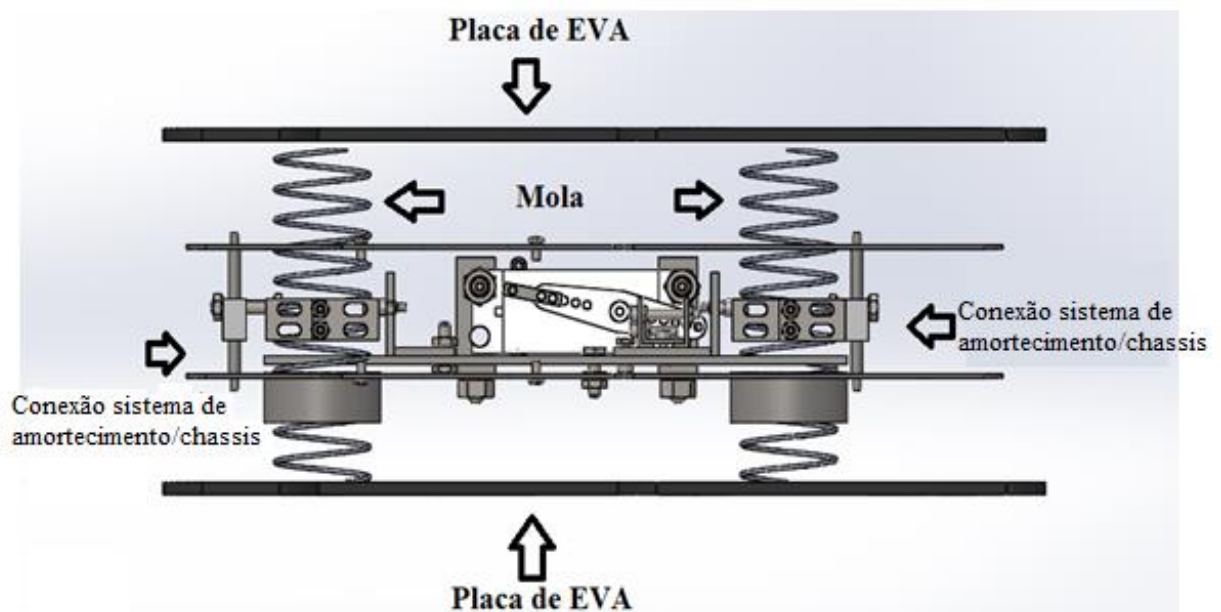


Figura 4.1 Sistema de amortecimento com componentes detalhados

#### 4.1.3 Elevação do sistema de amortecimento

A terceira etapa de funcionamento da plataforma móvel consiste na elevação do seu sistema de amortecimento. Esta etapa é crucial para permitir o deslocamento do robô, visto que as rodas do protótipo encostarão no solo somente após o sistema de amortecimento ser erguido pelo elevador. As figuras 4.2 e 4.3 a seguir apresentam a configuração anterior e posterior ao acionamento do elevador.

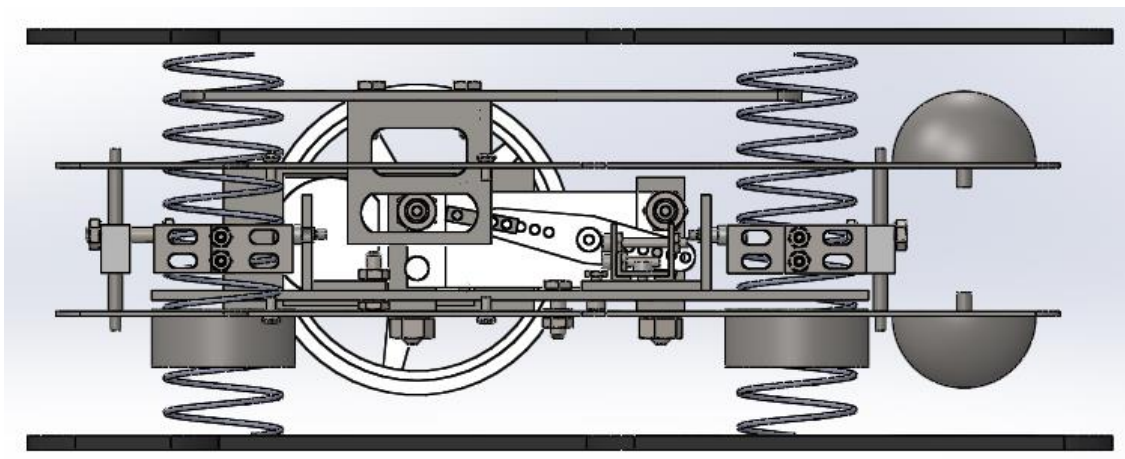


Figura 4.2 Robo antes de o elevador levantar o sistema de amortecimento

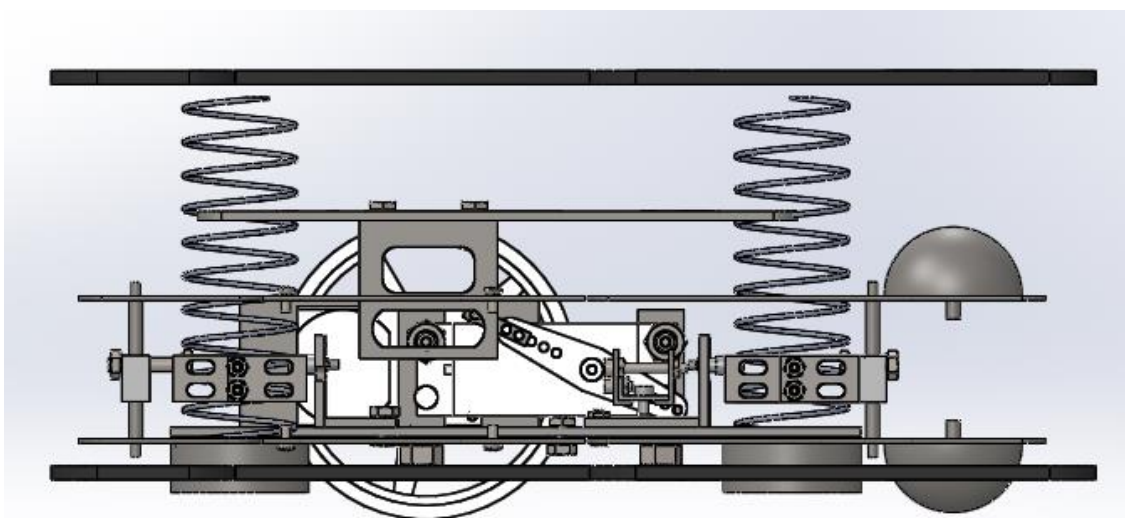


Figura 4.3 Robo depois de o elevador levantar o sistema de amortecimento

#### 4.1.4 Locomoção

A locomoção do protótipo fica por conta de duas rodas nas laterais do chassi acoplado com uma caixa redutora e um motor elétrico cada uma, além disso na parte traseira do robô existe uma rótula que funciona como terceiro ponto de apoio. Na figura 4.4 estão identificados as rodas e o terminal rotular.



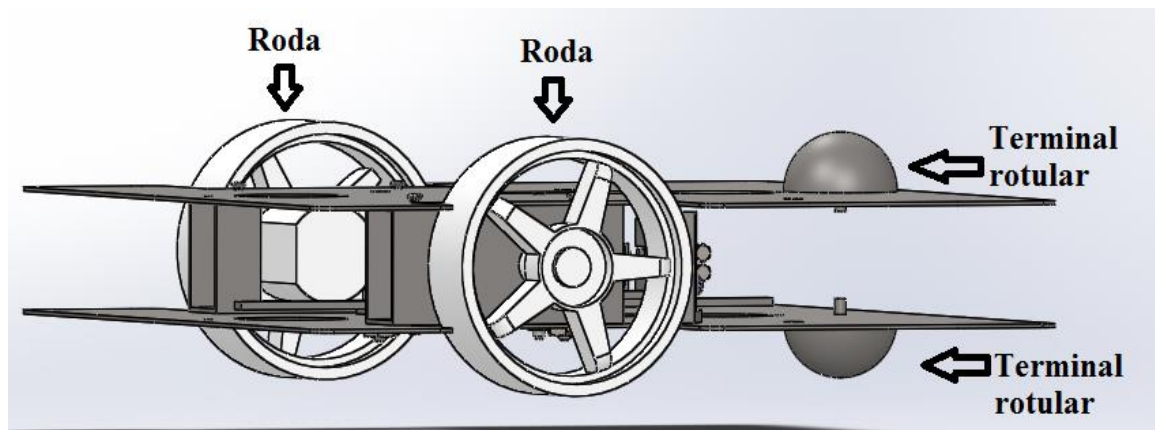


Figura 4.4 Imagem do chassi com as rodas e o terminal rotular.

#### 4.1.5 Captação e transmissão de imagens

Esta etapa é crucial pois seu mal funcionamento invalida todas as anteriores, visto que a captação e a transmissão de imagens são os objetivos principais deste protótipo. Portanto foram instaladas duas câmeras fixadas a estrutura do robô, uma frontal e outra traseira, as mesmas enviarão o sinal via *bluetooth* possibilitando assim explorar o ambiente desejado.

## 5 PARTES DO ROBÔ

### 5.1 Locomoção

Existem basicamente quatro tipos de rodas. A roda (a) designada *standard* apresenta dois graus de liberdade: rotação em torno do eixo de tração da roda e a rotação em torno de um eixo que passa pelo ponto de contato com a superfície. A roda (b) conhecida por castor móvel ou roda livre, também possui dois graus de liberdade, sendo que o eixo de rotação associado à direção está desalinhado do ponto de contato com a superfície. A roda (c) designada normalmente por roda omnidirecional (ex: Swedish ) apresenta uma configuração diferente, com roletes na periferia. Este terceiro tipo apresenta três graus de liberdade: rotação em torno do eixo de tração da roda, em torno dos roletes em contato com a superfície (passivo) eo terceiro em torno do eixo que passa pelo ponto de contato com a superfície. Existe ainda um quarto tipo (d), onde a roda é esférica e pode deslocar-se em qualquer direção no plano [9].

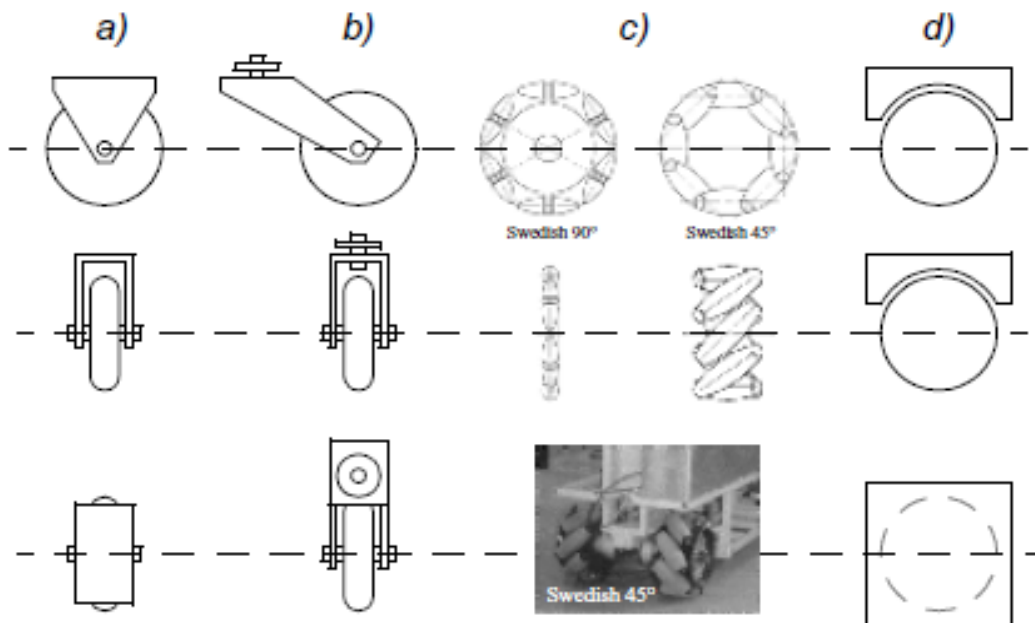


Figura 5.1 – Os quatro tipos de rodas utilizados em robôs móveis [9]

A roda *standard* quando comparada com a roda castor, é capaz de absorver forças laterais e transmiti-las diretamente para o chassi do veículo. Já as rodas Swedish e esférica apresentam restrições menores quanto as direções que o veículo pode tomar. A roda Swedish se assemelha com a Standard em relação ao baixo atrito nas direções

dos rolos, tipicamente colocados a  $40^\circ$  (Figura 5.2) ou  $90^\circ$ . O conceito de omnidirecionalidade atinge o seu ápice nas rodas esféricas [9].

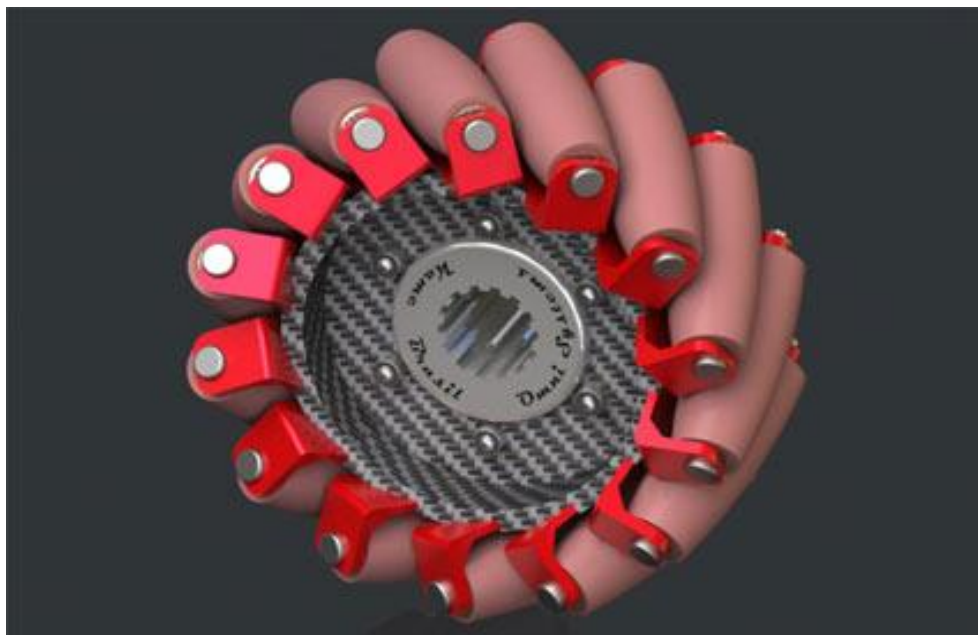

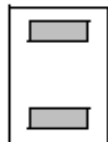
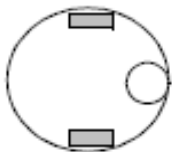

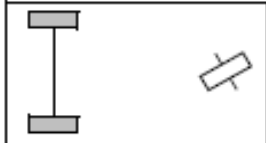

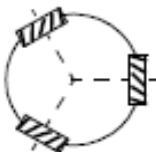
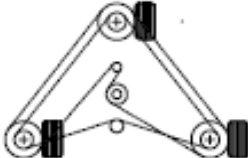
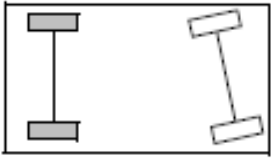
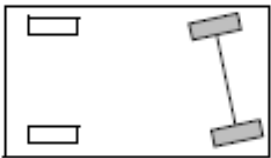
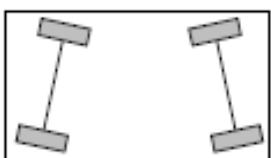
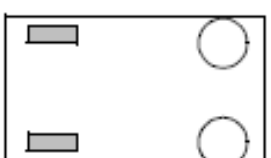
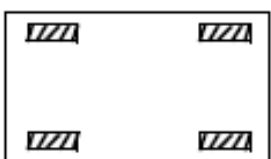
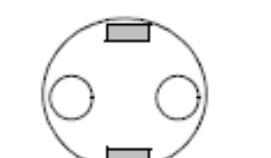
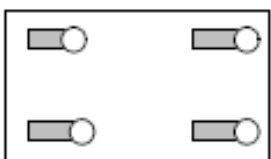


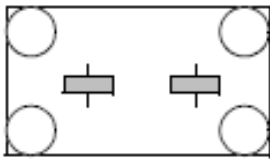
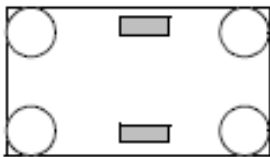







Figura 5.2 – Roda omnidirecional com configuração Swedish- $45^\circ$  [9]



Tabela 5.1 – Tabela retirada do livro “Atonomous Mobile Robots” [9]

Nº de rodas	Configuração física	Descrição	Exemplo
2		Uma roda de tração (traseira) e uma roda de direção (dianteira)	Bicicleta, motocicleta
		Duas rodas diferenciais com o centro de massa entre os seus eixos	Robô personalizado Cye
3		Duas rodas diferenciais centralizadas, com um terceiro ponto de contato	Smartrob EPFL
		Duas rodas motorizadas, independentes. Um apoio omnidirecional	Diversos robôs domésticos
		Duas rodas motorizadas, ligadas entre si. Uma roda direcional	Mini caminhões Piaggio
		Duas rodas dianteiras sem tração, roda traseira motorizada e direcional	Robô Netuno
		Três rodas motorizadas do tipo Swedish, colocadas com arranjo triangular	Kit robô piloto Palm (CMU)
		Três rodas motorizadas e sincronizadas entre si, mas sem controle da orientação da plataforma	I-Robô B24, Nomad 200

Nº de rodas	Configuração física	Descrição	Exemplo
4		Duas rodas motorizadas na traseira e duas rodas direcionais na frente.	Carro com direção traseira
		Duas rodas dianteiras independentes sem tração e duas rodas interligadas com tração	Carro com direção frontal
		Quatro rodas interligadas e motorizadas	Carro com direção nas quatro rodas
		Duas rodas de tração diferenciais e dois pontos omnidirecionais	Charlie (DMT-EPFL)
		Quatro rodas omnidirecionais	Carnegie Mellon Uranus
		Duas rodas diferenciais de tração e dois pontos adicionais de contato	EPFL Khepera, Hyperbot Chip
		Quatro rodas Castor motorizadas	Nomad XR4000

Nº de rodas	Configuração física	Descrição	Exemplo
6		Duas rodas motoras e direcionais alinhadas no centro, 1 ponto omnidirecional em cada canto	First
		Duas rodas motoras no centro e um ponto omnidirecional em cada canto	Terregator (Carnegie Mellon University)
Legenda			
	Roda movida omnidirecional (esférica, castor, Swedish)		
	Roda Swedish motorizada (Stanford wheel)		
	Roda movida		
	Roda motora		
	Roda motorizada castor		
	Roda standard direcional		
	Rodas conectadas		

Neste projeto serão utilizadas duas rodas, figura 5.3, duas do tipo *standard* devido a sua disponibilidade e preço, porém a mais adequada ao projeto seria a roda do tipo Swedish, esférica ou a utilização de esteiras. As rodas motoras serão alocadas nas laterais do chassi e estarão em contato com o solo para realizar a locomoção do veículo, independentemente do lado em que ele cair. Dois pontos de contato omnidirecionais colocados em faces opostas, portanto só irão tocar o solo caso a face em que ele estiver caia virada para o chão.

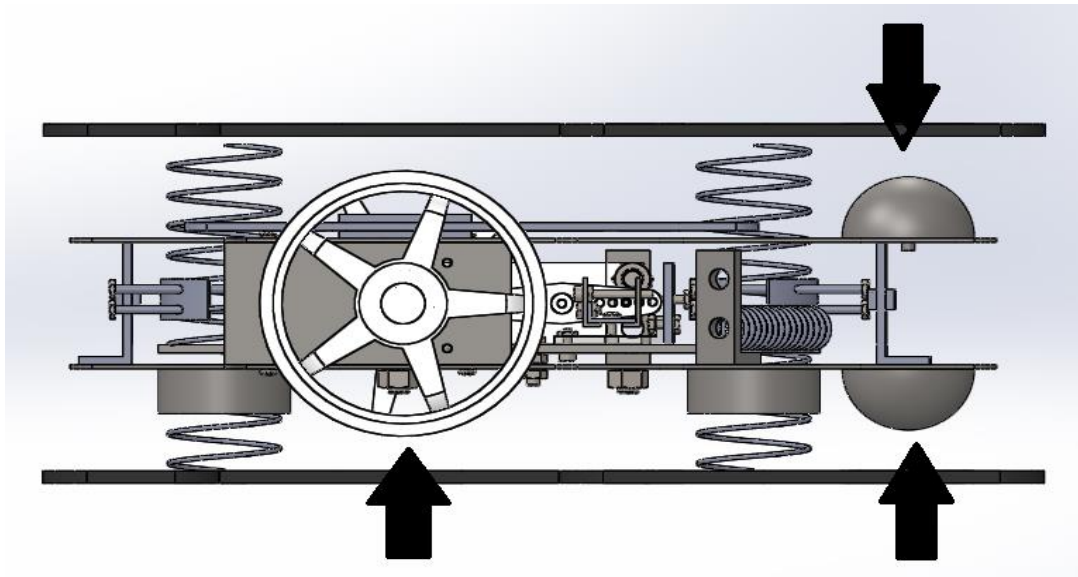


Figura 5.3 – Rodas utilizadas no projeto

## 5.2 Motores, Servos e Pneus

Para o deslocamento serão utilizados dois kits, figura 5.4, contendo um motor DC, caixa de redução (1:48) e roda de plástico com pneus de borracha com boa aderência proporcionando aderência suficiente para a tração do robô, na figura 5.5 é possível observar separadamente cada componente do conjunto. Este conjunto foi escolhido por apresentar fácil instalação e possuir todos os elementos já acoplados, na tabela 5.1 estão listadas as informações técnicas do motor.



Figura 5.4 – Kit motor DC e roda [10]

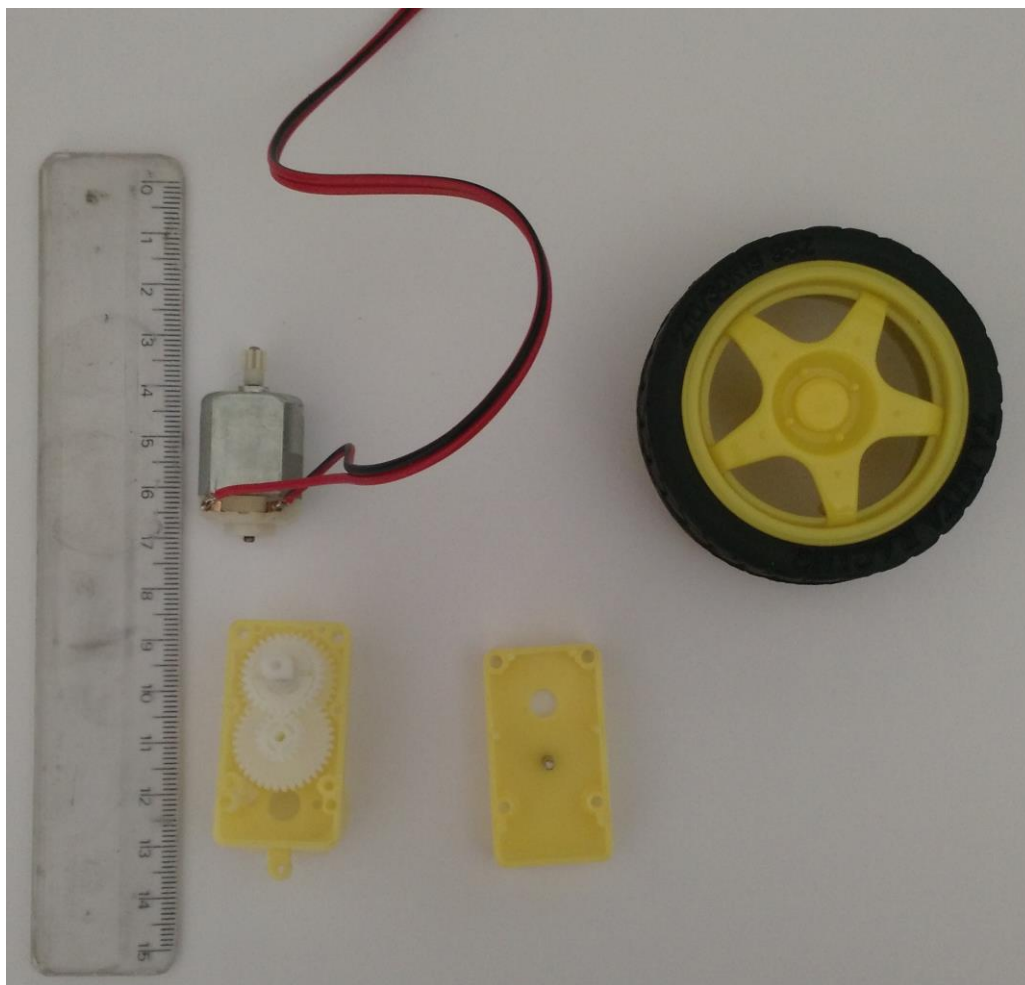


Figura 5.5 – Kit motor DC e roda separados

Tabela 5.2. Informações do motor

Tensão de alimentação dos motores	3 ~ 6VDC
Corrente máxima	120mA
Relação da redução	48:1
Rotação do motor a 6VDC	260 rpm

Para o acionamento do mecanismo denominado gatilho, será utilizado um servo motor com as especificações da figura 5.6. Este servo motor ficará responsável por deslocar o pino que funciona como batente mecânico, ele terá papel fundamental no protótipo pois realizará as duas primeiras ações após a queda que são: Acionar o gatilho e deslocar o sistema de amortecimento.

## Especificações

Modulation:	Analog
Torque:	<b>4.8V:</b> 33.30 oz-in (2.40 kg-cm) <b>6.0V:</b> 41.70 oz-in (3.00 kg-cm)
Speed:	<b>4.8V:</b> 0.28 sec/60° <b>6.0V:</b> 0.22 sec/60°
Weight:	1.57 oz (44.4 g)
Dimensions:	<b>Length:</b> 1.57 in (39.9 mm) <b>Width:</b> 0.79 in (20.1 mm) <b>Height:</b> 1.42 in (36.1 mm)
Motor Type:	3-pole
Gear Type:	Plastic
Rotation/Support:	Bushing
Rotational Range:	180°
Pulse Cycle:	(add)
Pulse Width:	550-2330 $\mu$ s
Connector Type:	J



Brand:	<b>Futaba</b>
Product Number:	FUTM0710
Typical Price:	14.99 USD
Compare:	<a href="#">add+</a>

Figura 5.6 – Servo motor [11]

## 5.3 Conjunto Chassi

O chassi da plataforma móvel é composto de duas chapas e perfis tipo metalon de alumínio com 2 mm de espessura, usinados (fresagem e furação) para tomar a forma apresentada na figura 5.8. Para garantir as tolerâncias geométricas, a rigidez estrutural do conjunto e facilidade de montagem/desmontagem, as peças (metalon) são vinculadas às chapas do chassi através de parafusos e porcas. Nesse conjunto são embarcados os mecanismos, a parte eletroeletrônica e os kits com o motor, redutor e roda.

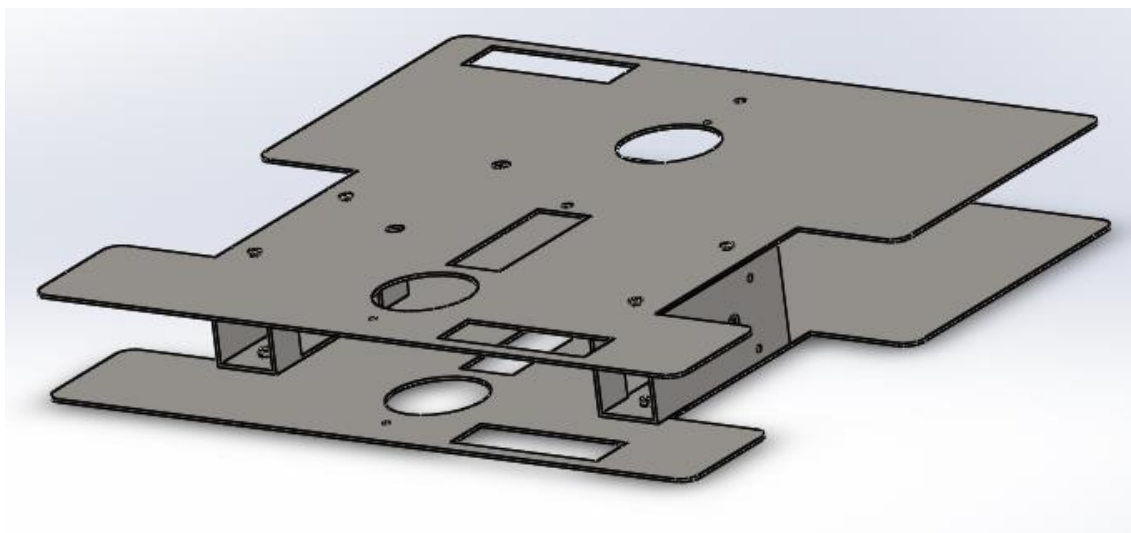


Fig. 5.7 – Conjunto chassi

## 5.4 Molas

Um sistema mecânico de amortecimento mais simples é composto por apenas um grau de liberdade contendo apenas uma massa, uma mola e um amortecedor. Ele é conhecido também como sistema padrão.

Entende-se por mola uma peça que possui flexibilidade elástica relativamente alta, isto é, que apresenta grandes deformações quando solicitada por um carregamento externo. A rigor, no entanto, todas as peças possuem alguma flexibilidade, já que não existe um corpo totalmente rígido. A mola opõe-se à força que ela está aplicada, armazenando energia potencial elástica.

As molas podem ser classificadas como lineares e não-lineares de acordo com o seu tipo de comportamento quando submetida a um carregamento. As molas lineares são aquelas em que as deformações são diretamente proporcionais às cargas aplicadas sob a mesma, obedecendo portanto a Lei de Hooke. Caso contrário, a mola é do tipo não-linear. O gráfico da figura 5.8 ilustra o conceito de linearidade, apresentando como a força  $F$  (ou o torque  $T$ , em sistemas torcionais) em função do deslocamento translacional (ou deslocamento torcional  $\theta$ ) [12].

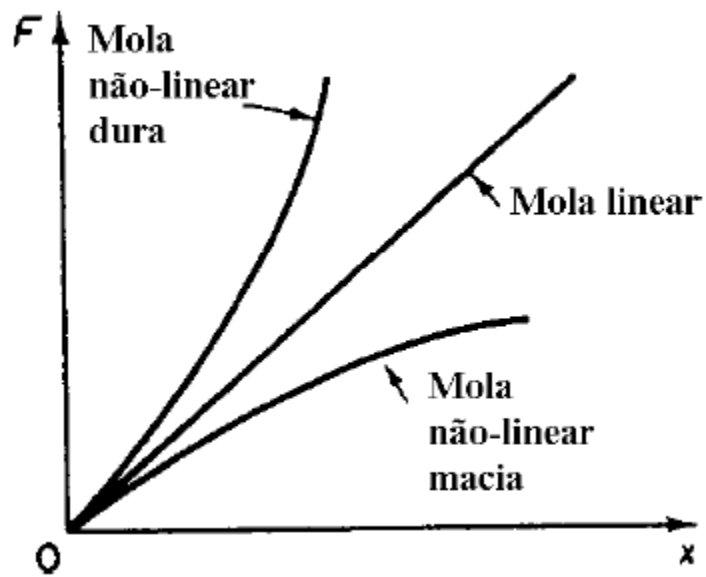


Figura 5.8 – Gráfico de linearidade [12]

É muito comum a combinação de duas ou mais molas associadas em um mecanismo. As molas podem ser associadas em série ou em paralelo como mostra as figuras 5.9 e 5.10. Para obter um sistema mecânico padrão no qual existe apenas uma mola é necessário encontrar uma mola fictícia cuja rigidez seja equivalente à associação feita.

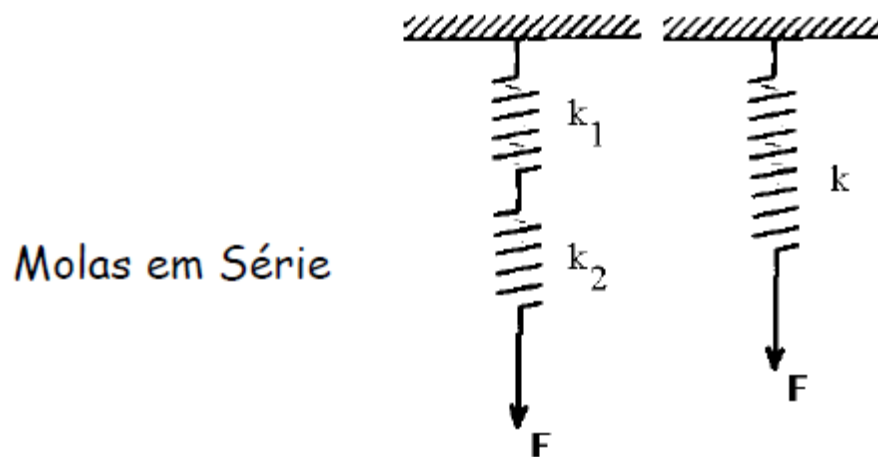


Figura 5.9 – Associação de molas em série



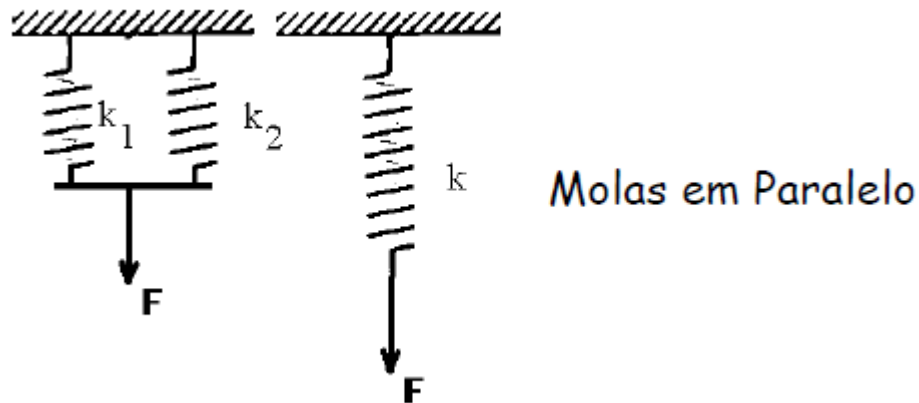


Figura 5.10 – Associação de molas em paralelo

As expressões a seguir mostram como obter o valor da constante elástica ( $k$ ) da mola fictícia, equivalente ao da associação.

- Molas em série

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad (\text{eq. 5.1})$$

- Molas em paralelo

$$k = k_1 + k_2 \quad (\text{eq. 5.2})$$

Para o projeto do sistema de amortecimento da plataforma móvel foi feito o uso do recurso de associação de molas, portanto não se torna necessário o cálculo da constante de elasticidade neste sistema.

O objetivo das molas utilizadas no mecanismo do gatilho é manter tensionada a barra principal deste para que, quando ele seja liberado pelo servomotor, a barra consiga se deslocar vencendo as forças de atrito atuantes sobre tal mecanismo. A figura 5.11 mostra como as molas foram posicionadas.

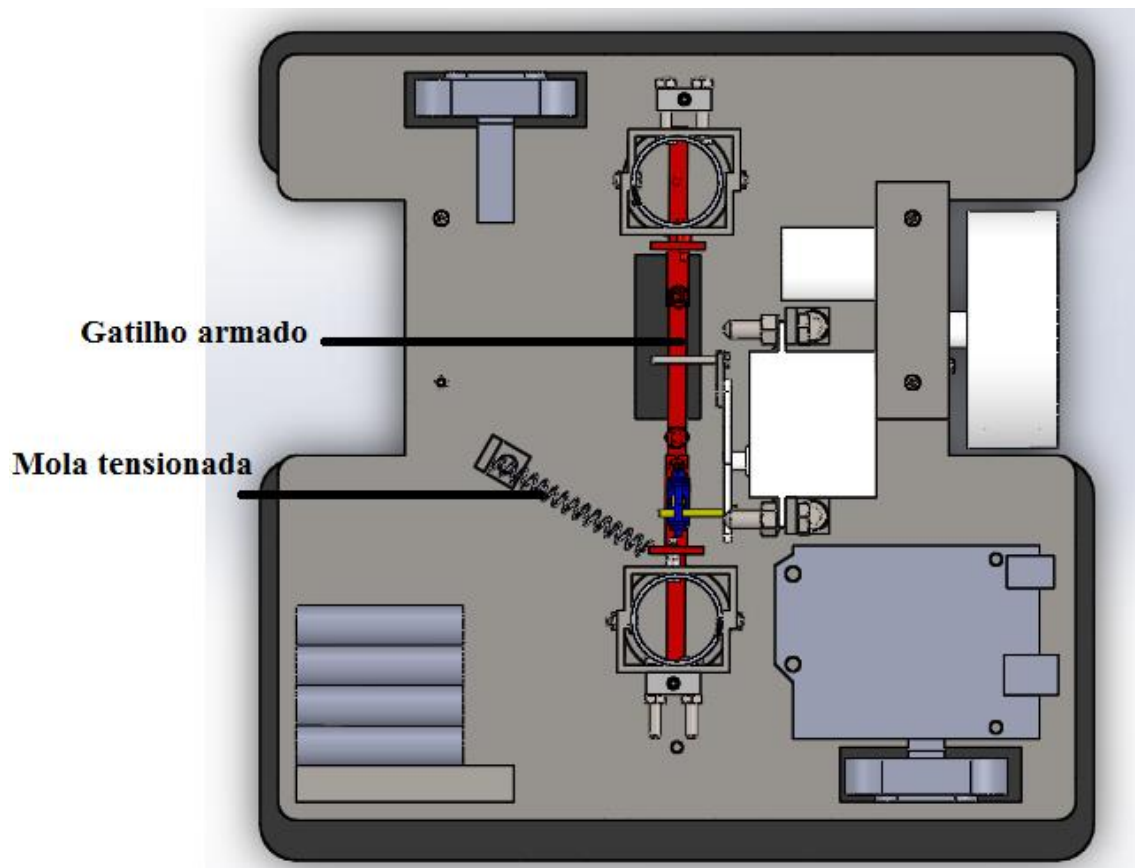


Figura 5.11 – Molas do gatilho (amarelo)

As duas molas de compressão apresentadas na figura 5.12, foram colocadas para transferir para as placas de EVA, que efetivamente são os amortecedores, a energia potencial gravitacional e energia cinética da plataforma no momento do impacto ao solo, evitando-se assim que a estrutura e partes móveis do protótipo sofram qualquer impacto e danifiquem seus componentes internos. As molas do sistema de amortecimento do protótipo foram pré-tensionadas para que elas comecem a trabalhar em uma região em que apenas forças consideráveis sejam capazes de realizar deformações, como mostra o gráfico da figura 5.13. Para conseguir deformar mais a mola é necessário aplicar uma força maior que a da pretensão.

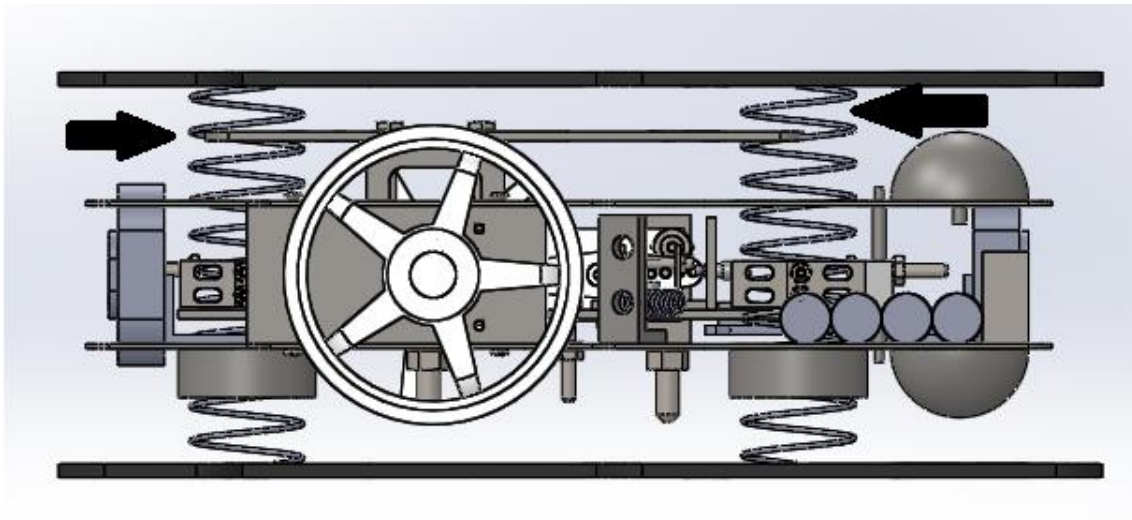


Figura 5.12 – Molas do sistema de amortecimento

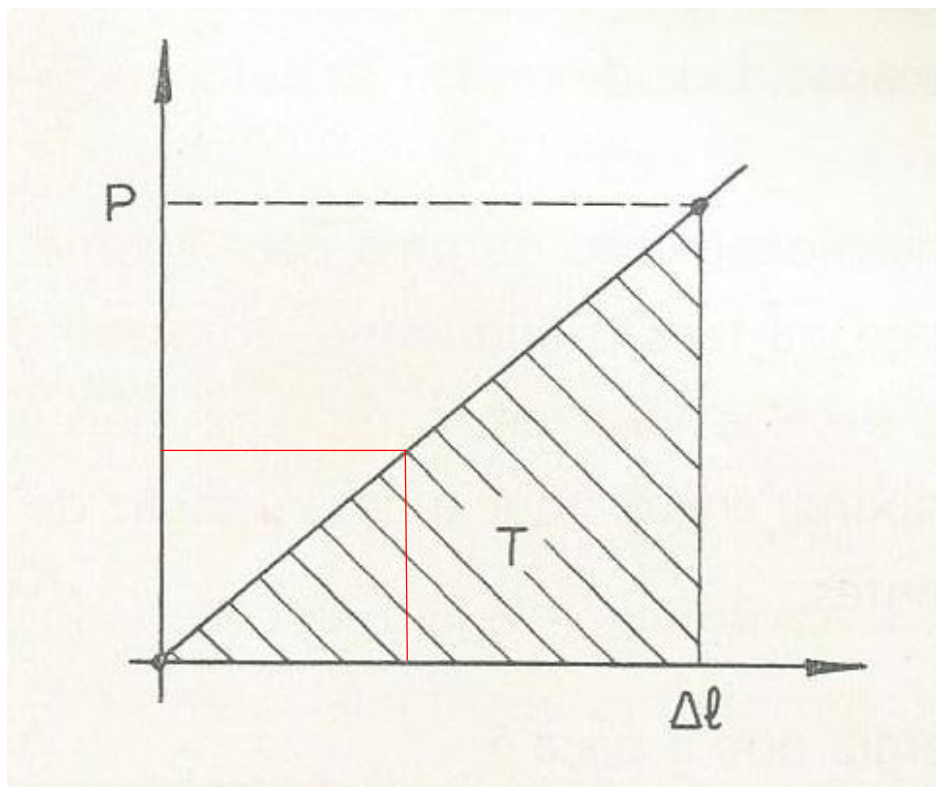


Figura 5.13 – Gráfico da deformação da mola indicando a pré-tensão [13].

## 5.5 Amortecedores

Os amortecedores podem ser classificados em três grupos: passivos, semiativo e ativos. A presente monografia tratará apenas dos amortecedores passivos, os quais não necessitam nem de informações sobre o comportamento da estrutura nem de energia externa.

Amortecedores são utilizados para dissipar energia, diminuindo a amplitude da vibração. Portanto sua utilização no projeto é vista como fundamental para o auxílio da absorção do impacto do robô na hora da queda. Em função da necessidade de se ter um robô compacto, os amortecedores em forma de chapa foram dispostos nas partes superior e inferior do protótipo a fim de trabalharem nas diversas situações possíveis de queda. Após o robô ser lançado o seu primeiro componente a entrar em contato com o solo será uma das chapas.

O material selecionado para a fabricação das chapas amortecedoras foi uma placa de 10 mm de EVA (Acetato de Vinila), disponível no Laboratório de Robótica PEM/DEM-UFRJ. Este material apresenta boa capacidade de absorver impacto sem sofrer elevada deformação plástica funcionando semelhantemente a um amortecedor, possui facilidade de corte, baixo custo e além disso não é necessário a sua substituição para outros lançamentos. Porém é necessário ressaltar que por se tratar de um polímero termoplástico ele não suporta altas temperaturas impedindo com que o robô atue em tais regiões. O EVA pode ser cortado e furado para tomar a forma desejada mostrada na figura 5.14.

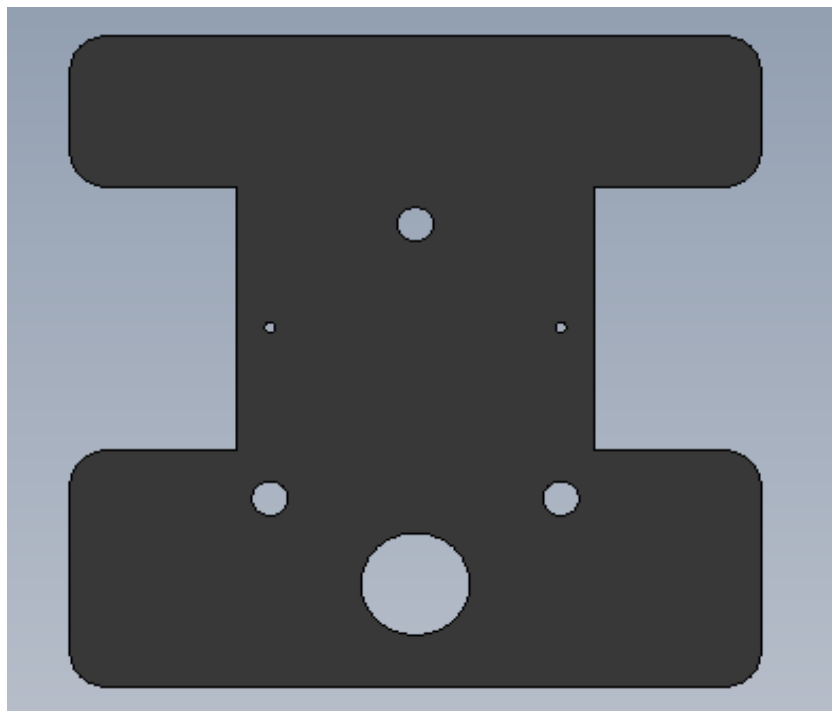


Figura 5.14 – Placas amortecedoras em EVA

## 5.6 Mecanismo do Gatilho

Este mecanismo foi desenvolvido para vincular as molas com o chassi, de forma que quando ele estiver armado a mola estará presa, figura 5.15, e quando ele for acionado a mola estará livre em relação a estrutura, figura 5.16. Este vínculo é fundamental pois conecta o sistema de amortecimento à plataforma.

As molas passam por dentro da peça denominada “Suporte da mola” e travada por quatro parafusos, figura 19. O suporte da mola por sua vez está ligado ao mecanismo do gatilho e do elevador através dos pinos em destaque na figura 20, após o acionamento do mecanismo o vínculo do suporte com o gatilho é quebrado permitindo que o sistema de amortecimento seja deslocado.

O acionamento do mecanismo ocorre de acordo com as seguintes etapas: Inicialmente o servomotor (figura 5.15) é acionado fazendo com que o efetuator final (hélice) gire, por sua vez o pino de elevação posicionado na extremidade da hélice irá deslocar o acionador junto com o pino trava.

O pino trava é responsável por manter o mecanismo travado na posição inicial, para isso ele atravessa o acionador, a barra do gatilho e a chapa do chassi. A mola tensionada destacada na figura 5.17 faz com que a barra do gatilho pressione o pino trava que por sua vez topa na chapa do chassi impedindo a rotação do mecanismo.

É importante destacar que a mola tensionada da figura 5.17 deva ser capaz de impedir que o pino trava saia da sua posição caso a plataforma caia com este mecanismo virado para baixo ou durante a queda.

Após a elevação do pino-trava o gatilho (figuras 5.16 e 5.17) estará liberado permitindo que a mola tensionada (figura 5.17) possa puxar todo o sistema marcado de vermelho até a configuração final mostrada na figura 5.17.

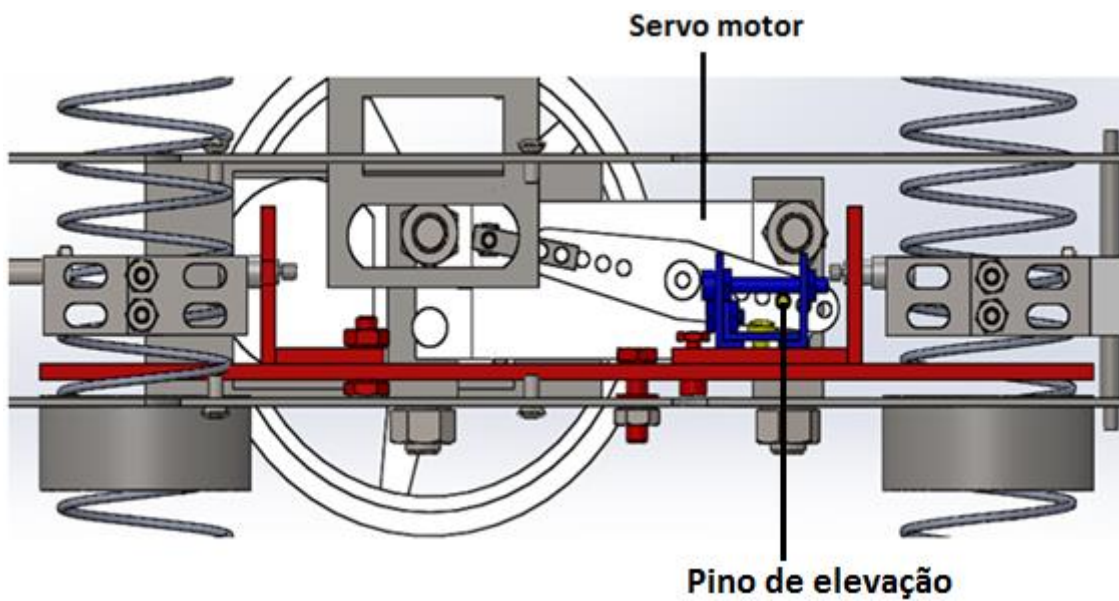


Figura 5.15 – Sistema de gatilho armado (vermelho) + acionador (azul) + pino (amarelo)

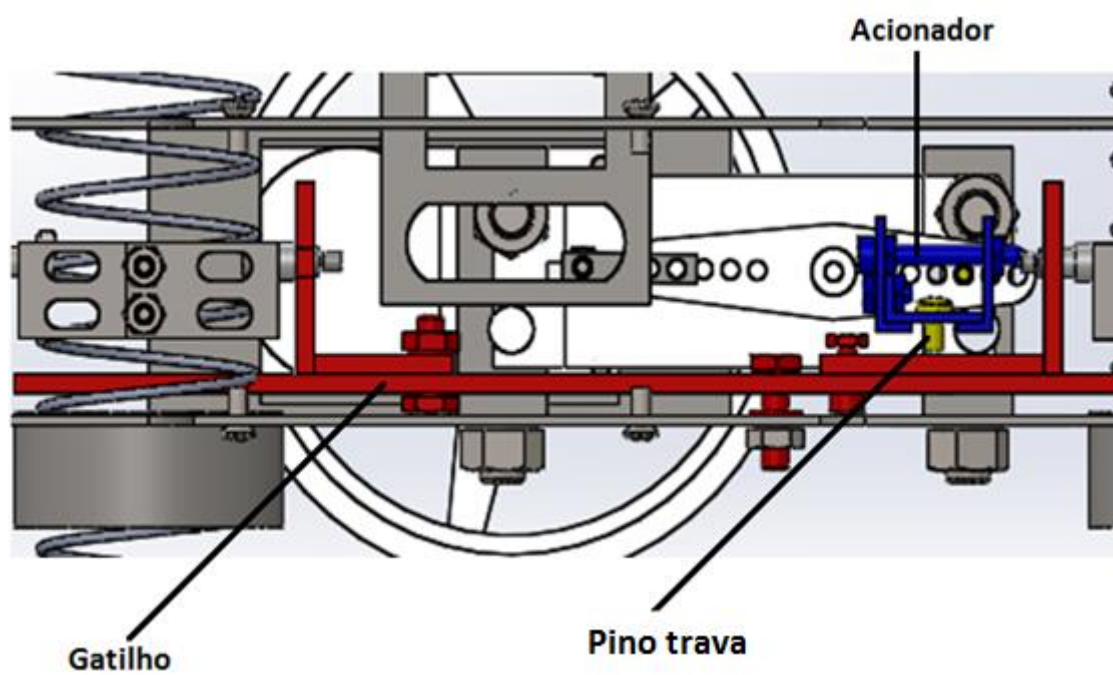


Figura 5.16 – Vista lateral do Sistema de gatilho desarmado (vermelho) + acionador (azul) + pino (amarelo)

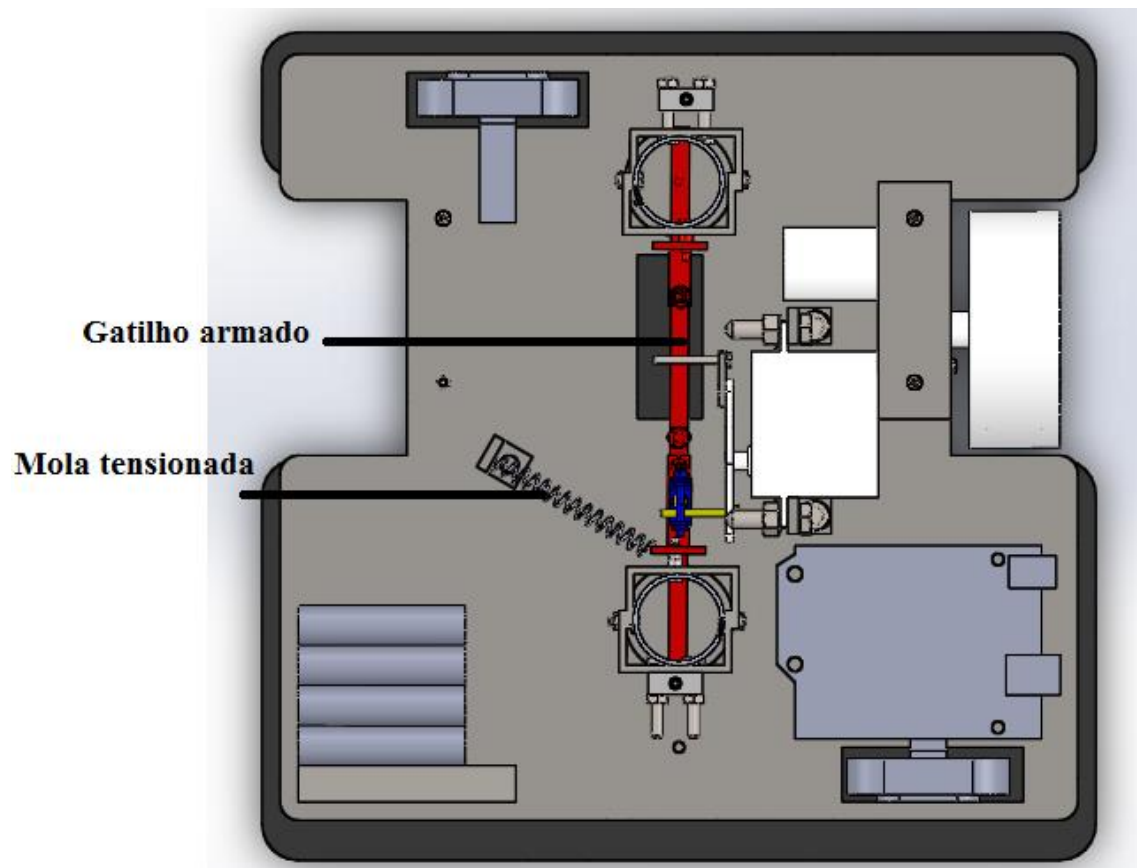


Figura 5.17 – Vista superior do Sistema de gatilho armado (vermelho) + acionador (azul) + pino (amarelo)



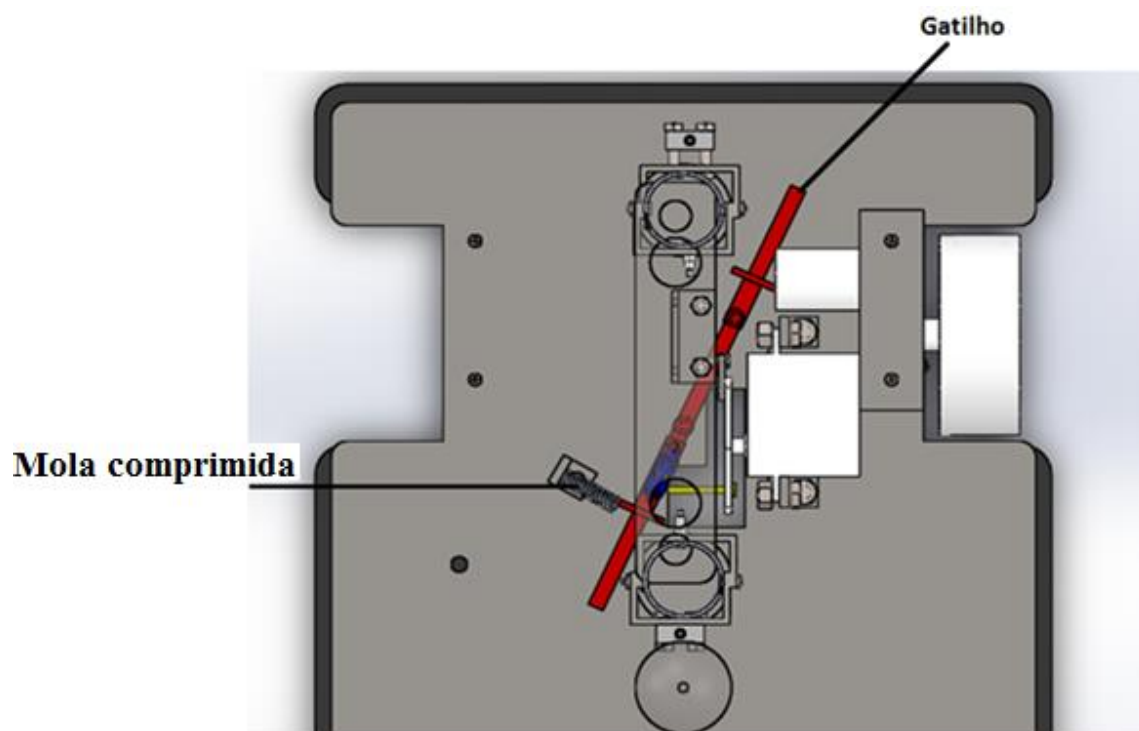


Figura 5.18 – Vista superior do Sistema de gatilho desarmado (vermelho) + acionador (azul) + pino (amarelo)

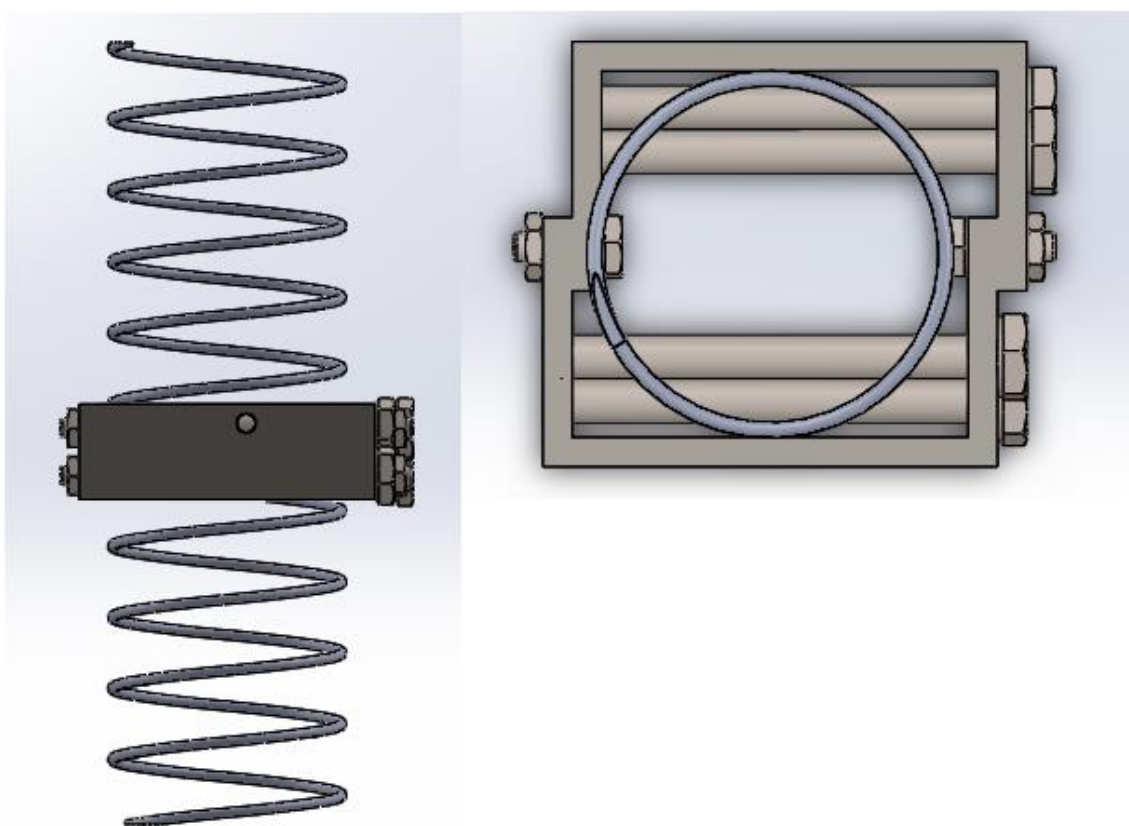


Figura 5.19 – Fixação da mola no seu suporte/ Vista frontal e superior



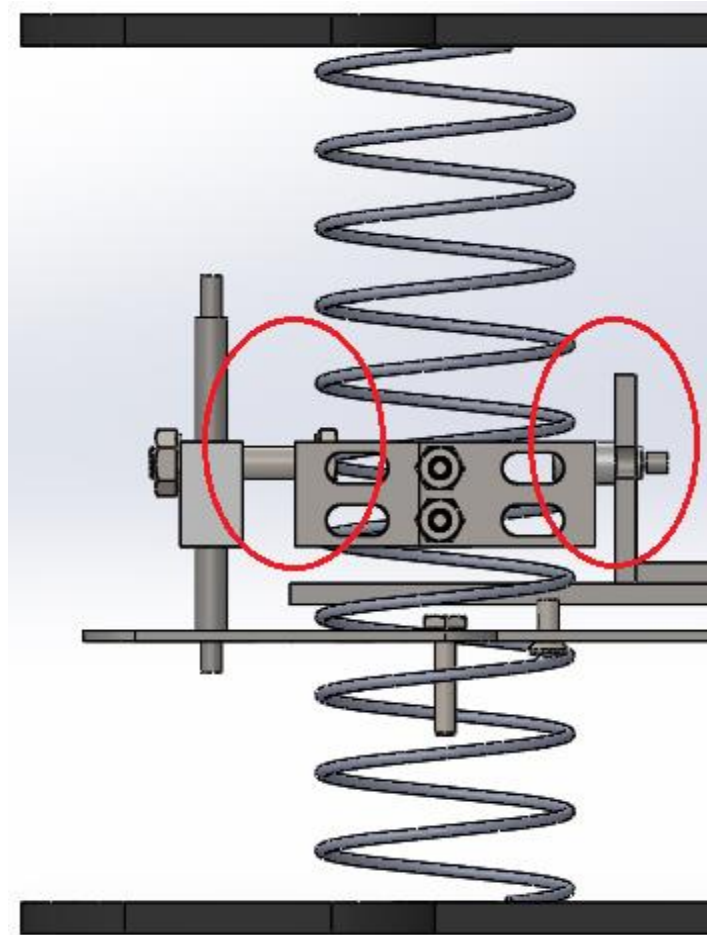


Figura 5.20 – Pino de conexão do suporte da mola no elevador (esquerda) e gatilho (direita)

## 5.7 Mecanismo de Elevação

Este mecanismo possui a função de elevar todo o sistema de amortecimento com o intuito de garantir que as rodas possam tocar o solo e realizar a movimentação do protótipo. Ele é acionado pelo mesmo servo motor que libera o mecanismo do gatilho, portanto foi necessário a utilização de perfis em “L” para garantir que o gatilho fosse acionado antes que o mecanismo de elevação começasse a atuar. A configuração final está apresentada na figura 5.21.

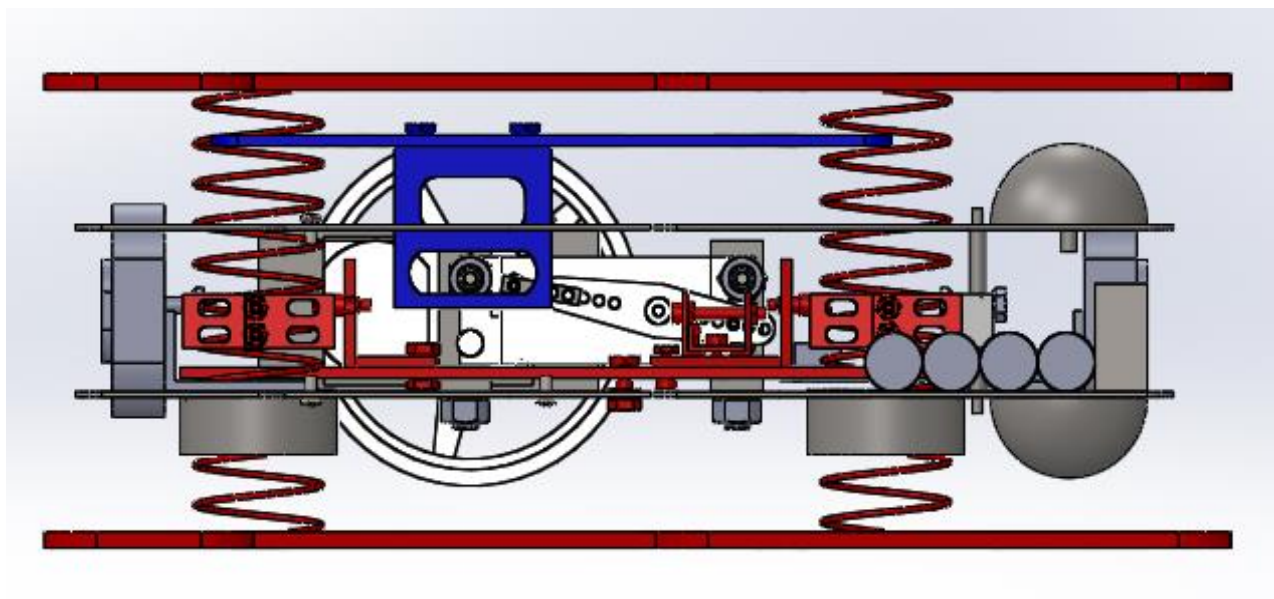


Figura 5.21 – Sistema de amortecimento (vermelho) + elevador (azul)

## 5.8 Unidade de Processamento - Arduino

Para o controle do robô foi utilizado uma placa de Arduino Uno, figura 5.22, constituída por controladora Atmel AVR de 8 bits, pinos digitais e analógicos de entrada e saída, entrada de USB. Esta placa não possui recurso de rede, mas pode ser combinada com outros Arduinos criando extensões chamadas de Shields. [14]

Em termos de software, suas funcionalidades podem ser desenvolvidas em C/C++ utilizando uma interface gráfica escrita em Java. Portanto esta placa ficará responsável por comandar os motores de deslocamento e o servo motor dos mecanismos.

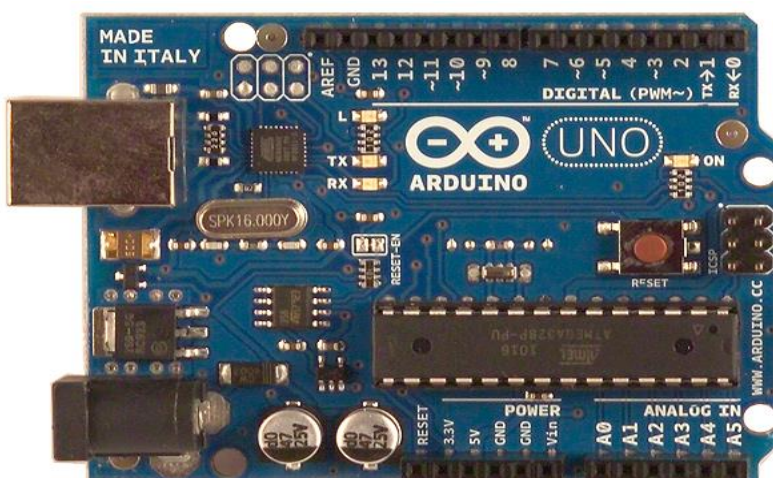


Figura 5.22 – Placa Arduino Uno [14]

## 5.9 Câmera

A camera selecionada para a captação das imagens foi a LifeCam-HD 3000 da Microsoft, figura 5.23. Ela possui conexão via USB 2.0, capaz de captar 30 frames por segundo, campo de visão de 68,5°, produz vídeos em HD de 720 pixel, foco de 0,3m até 1,5m, ajuste automático das cores e possui microfone integrado capaz de captar ruídos entre 200Hz até 20 kHz [8].



Figura 5.23 Imagem da câmera utilizada [8].

## 5.10 Unidade de Potência – Baterias

Para o funcionamento correto do robô é necessário que todos os seus componentes eletrônicos estejam corretamente conectados a bateria, e a mesma seja capaz de fornecer energia suficiente. Os componentes do protótipo que necessitam de energia para funcionar são: Motores elétricos, servo motor, placa de arduino e câmera.

A placa de arduino ficará responsável por o acionamento dos demais componentes e consequentemente a distribuição de energia conforme necessário. Portanto para alimentar o arduino Uno será utilizado a bateria 5000mAh Elite NiMh, figura 5.24 capaz de fornecer os 12V necessários. Com essa bateria é possível fazer uma configuração customizada, figura 5.23, utilizando os conectores e fios fornecidos ao comprar o produto [15].



## 5000 NiMh

Size: SC  
Diameter: 23.11mm  
Height: 43.18mm  
Weight: 67.19g/2.37oz  
Capacity: 5000mAh  
50A Continuous Current

Figura 5.24 Bateria 5000mAh Elite NiMh [15]



Figura 5.25 Configuração customizada [15]

## 6 ANÁLISE MATEMÁTICA DO SISTEMA DE AMORTECIMENTO

Nesta seção serão apresentados os cálculos básicos para definição das preliminares do projeto, além dos cálculos básicos de elementos de máquina para seus respectivos dimensionamentos e seleção.

### 6.1 Força de Atrito Máximo

Para garantir que o deslocamento da plataforma ocorra é necessário que os motores forneçam potência suficiente para superar o atrito dos pneus com o solo. A seguir serão apresentados os cálculos das forças de atrito máximo para os diferentes tipos de solo apresentados na tabela 6.1.

Tabela 6.1– Propriedades Tribológicas [16]

<b>Materiais em contacto</b>	<b>Condição</b>	<b>Coefficiente de atrito estático</b>	<b>Coefficiente de atrito cinético</b>
Borracha / Aço	Seco	0,6 – 0,9	0,3 – 0,6
Borracha / Asfalto	Seco	0,7 – 0,9	0,5–0,8
Borracha / Asfalto	Molhado	–	0,25–0,75
Borracha / Borracha	Seco	–	1,16
Borracha / Cartão	Seco	0,5 – 0,8	–
Borracha / Cimento	Seco	1,0	0,6–0,85 – 1,02
Borracha / Cimento	Molhado	0,30 – 0,62–0,70	0,45–0,75
Borracha / Metal	Seco	1,0	–

O veículo possui três componentes em contato com o solo: duas rodas de tração e um terminal rotular (figura 4.4). Logo, para se estimar a força de atrito gerada no deslocamento, foi considerado um modelo simplificado (situação conservativa), onde o centro de massa localiza-se entre as rodas.

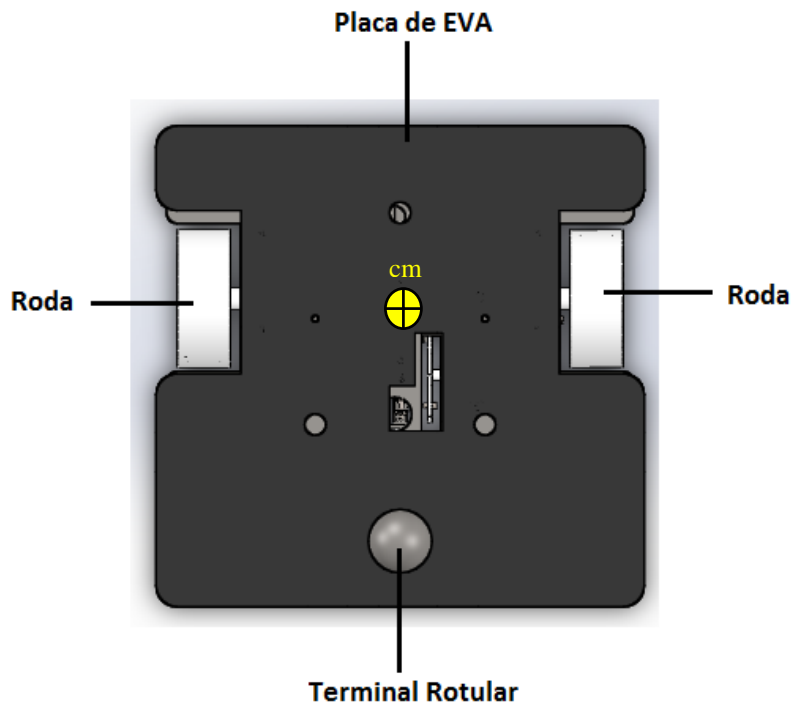


Figura 6.1. Localização considerada do centro de massa.

Portanto, a carga normal agindo em cada uma das rodas será dada por:

$$F_N = m_c \times g / 2 \quad (\text{eq. 6.1})$$

onde,

$F_N$  = força normal

$m_c$  = massa do veículo

$g$  = aceleração da gravidade

Considerando-se que a massa do carro fornecida pelo programa SolidWorks é de: 3299.68 gramas ou aproximadamente 3,3 kg, tem-se:

$$F_N = 3,3 \times 9,81 = 32.4 \text{ N} \quad (\text{eq. 6.2})$$

A força de atrito máxima em cada roda é fornecida pela equação 6.3:

$$Fat_{m\acute{a}x} = \mu * F_N \quad (\text{eq. 6.3})$$

Os resultados mostrados na tabela 6.2 se referem a valores de forças de atrito máximo atuando nas duas rodas para diferentes tipos de solo.

Tabela 6.2 - Forças de atrito estático e cinético para os diferentes tipos de solo

Materiais em contato	Condição	Coeficiente de atrito estático	Força de atrito estático [N]	Coeficiente de atrito cinético	Força de atrito cinético [N]
Borracha/ Aço	Seco	0,6 – 0,9	19,4 - 29,1	0,3 – 0,9	9,71 - 29,1
Borracha/ Asfalto	Seco	0,7 – 0,9	22,6 - 29,1	0,5 – 0,8	16,1 - 25,8
Borracha/ Asfalto	Seco	-	-	0,25 – 0,75	8,0 - 24,2
Borracha/Borracha	Molhado	-	-	1,16	37,5
Borracha/Cartão	Seco	0,5-0,8	16,1 - 25,8	-	-
Borracha/Cimento	Seco	1,0	32,3	0,6 – 0,85 – 1,02	19,4 - 27,5 - 33,0
Borracha/Cimento	Molhado	0,30-0,62-0,70	9,7 - 20,0 - 22,6	0,45 – 0,75	14,5 - 24,2
Borracha/Metal	Seco	1,0	32,3	-	-

## 6.2 Cálculo da Potência do Motor

A plataforma possui dois motores responsáveis pelo seu deslocamento, porém em determinadas situações, como nas curvas, apenas um deles estará atuando. Portanto é de suma importância garantir que seja possível a movimentação nesta situação mais crítica.

Com isso, a velocidade linear do robô nesta situação é dada por:

$$v_{linear} = \omega * R \quad (\text{eq. 6.4})$$

A velocidade angular do motor é de 260 RPM e a que chegará na roda será 48 vezes menor devido a taxa de redução da caixa redutora acoplada no motor (48:1), portanto a velocidade angular da roda será de 5,4 RPM. Com isso pode-se calcular a velocidade linear do robô para a situação de apenas um motor atuando.

$$\omega = 5,4 \text{ RPM} \therefore \omega = 5,4 * \frac{2\pi \text{ rad}}{60 \text{ s}} \rightarrow \omega = 0,6 \text{ rad/s} \quad (\text{eq. 6.5})$$

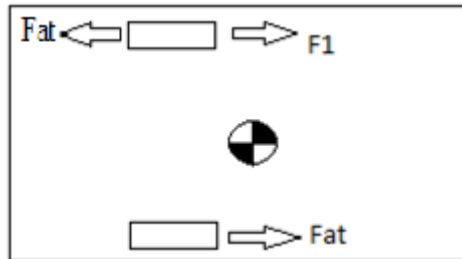
Sabendo que:

$$\phi_{roda} = 65 \text{ mm} \rightarrow R = 65 * 10^{-3} \text{ m} \quad (\text{eq. 6.6})$$

Tem-se que:

$$v_{linear} = \omega * R \therefore v_{linear} = 0,6 * 65 * 10^{-3} \therefore v_{linear} = 3,9 * 10^{-2} \text{ m/s} \quad (\text{eq. 6.7})$$

Com a velocidade linear e a força de atrito máxima e mínima calculadas, é possível determinar a potência de projeto requerida. Deve-se atentar para o caso em que o robô roda em torno do seu próprio eixo. Nesse caso tem-se apenas um motor exercendo força e a força de atrito atuando nas duas rodas, logo, desprezando as forças de resistência do ar e aceleração angular.



$$(F_1 - \frac{Fat_{max}}{2}) x s_1 = \frac{Fat_{max}}{2} x s_2 \quad (\text{eq. 6.9})$$

$$F_1 x 82,1 = \frac{37,5}{2} x 102,8 + \frac{37,5}{2} x 82,1 \quad (\text{eq. 6.10})$$

$$F_1 = 42,2 \text{ N}$$

Onde:

$F_1$  é a força do motor

$Fat_{max}$  é a força de atrito na roda para piso de borracha

$s_1$  é a distância do centro de massa até a roda motora



$s_2$  é a distância do centro de massa até a roda movida

Determinando a potência necessária do motor.

$$Pot = F * v_{linear} \quad (eq. 6.11)$$

$$Pot_{m\acute{a}x} = F_1 * v_{linear} \rightarrow Pot_{m\acute{a}x} = 42,2 \text{ N} * 0,039 \frac{m}{s} = 1,6 \text{ W} \quad (eq. 6.12)$$

### 6.3 Análise Matemática do Sistema de Amortecimento

Nesta seção serão consideradas as possíveis formas com que o robô se choca com o solo. Para isso será utilizada uma altura máxima de referência com o intuito de estimar a força de impacto. Inicialmente são empregadas as equações da conservação da quantidade de movimento assumindo que o corpo em questão só apresentará dois tipos de movimento (rotação e translação).

#### 6.3.1 Lançamento vertical em translação pura

Na análise será considerado o lançamento vertical com translação apenas. Seja um corpo rígido C, de massa m e centro de massa G, realizando um movimento no plano de referência XY, com referencial inercial no solo, figura 6.12. Na situação de lançamento vertical para cima, à medida que um corpo lançado para cima sobe a sua velocidade escalar diminui até que se anule no ponto de altura máxima. Isso ocorre porque o movimento é retardado, ou seja, o movimento se dá contra a ação da gravidade.

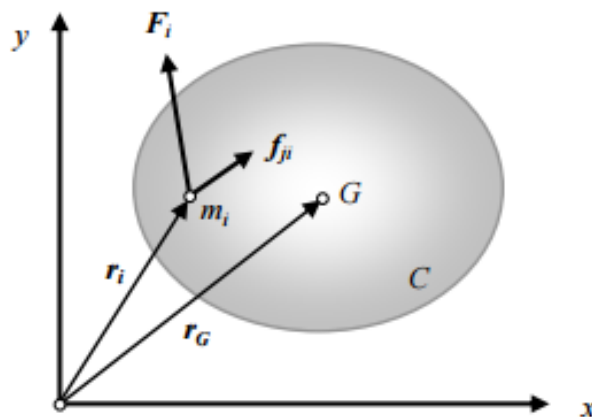


Figura 6.2 - Forças numa partícula i de um corpo rígido C [20].

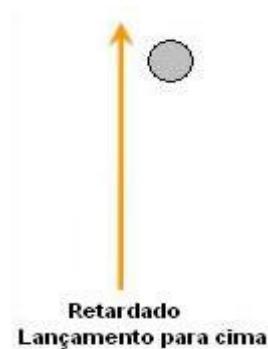


Figura 6.3 – Movimento retardado, lançamento para cima [21]

Sabe-se que a soma das forças internas do corpo em questão é nula, logo são utilizadas as fórmulas a seguir para descrever o movimento do centro de massa de corpos rígidos quando um corpo tem movimento de translação retilíneo.

$$\sum F_x = ma_x \quad (\text{eq.6.13})$$

$$\sum F_y = mg \quad (\text{eq. 6.14})$$

$$\sum M_g = 0 \quad (\text{eq. 6.15})$$

Equação do espaço em queda livre

$$H = \frac{gt^2}{2} \quad (\text{eq. 6.16})$$

Equação da velocidade na queda livre

$$v = gt \quad (\text{eq. 6.17})$$

Equação de Torricelli para a queda livre.

$$v^2 = 2g\Delta s \quad (\text{eq. 6.18})$$

Onde:

$F_{res}$  = Força resultante

$F_i$  = Força externa

$m$  = massa

$a_x$  = aceleração do centro de massa no sentido do eixo x

$g$  = aceleração da gravidade

$M_g$  = momento em relação ao centro de massa

$t$  = tempo de queda

$H$  = altura da queda

$v$  = velocidade

Para se estimar o tempo de queda do protótipo pode-se utilizar a equação de deslocamento em queda livre no espaço, para a altura máxima almejada no projeto (2 m). Logo,

$$H = \frac{gt^2}{2} \therefore 2 = \frac{9,81 t^2}{2} \therefore t = 0,4s \quad (\text{eq. 6.19})$$

O deslocamento em relação ao eixo  $x$  dependerá do ângulo de inclinação em relação ao solo no momento do arremesso e da força empregada pelo utilizador, portanto cada lançamento terá seu respectivo deslocamento.

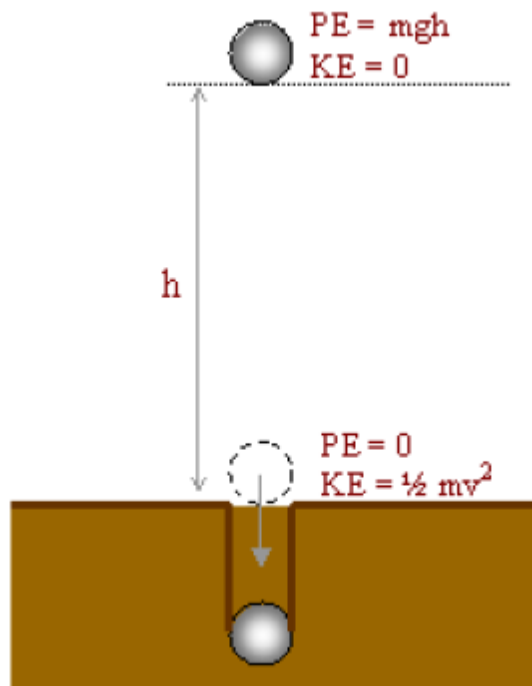


Figura 6.4 – Energia cinética e potencial gravitacional nos pontos de altura máxima e mínima

No momento em que o corpo atinge a altura máxima do lançamento sua energia potencial gravitacional chega ao seu valor máximo, enquanto que a energia cinética do

mesmo se anula. Já no ponto de altura mínima a energia potencial se anula e a energia cinética chega ao seu valor máximo, portanto obtém-se a seguinte igualdade.

*Energia potencial gravitacional inicial = Energia cinética final*

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{eq. 6.20})$$

A partir desta equação chega-se a velocidade do corpo antes do impacto:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (\text{eq. 6.21})$$

Para essa situação determina-se a força média do impacto através das fórmulas do teorema trabalho-energia e trabalho. São elas:

$$W = \frac{1}{2}mv^2_f - \frac{1}{2}mv^2_i \quad (\text{eq. 6.22})$$

$$W = F \times d \quad (\text{eq. 6.23})$$

Como visto anteriormente a energia cinética inicial é zero, portanto chega-se ao seguinte resultado.

$$F_{\text{impacto média}} = \frac{\frac{1}{2}mv^2_f}{d} \quad (\text{eq. 6.24})$$

### 6.3.2 Corpo rígido em queda livre com rotação

Neste caso será analisada a situação em que o robô além de transladar irá girar, portanto o contato com o solo será algo parecido com a ilustração a seguir (figura 6.5). Pode-se analisar separadamente o movimento de rotação e o de translação. Para o de translação a análise será igual à realizada na seção 6.7.1, assim o foco será apenas no movimento rotativo.

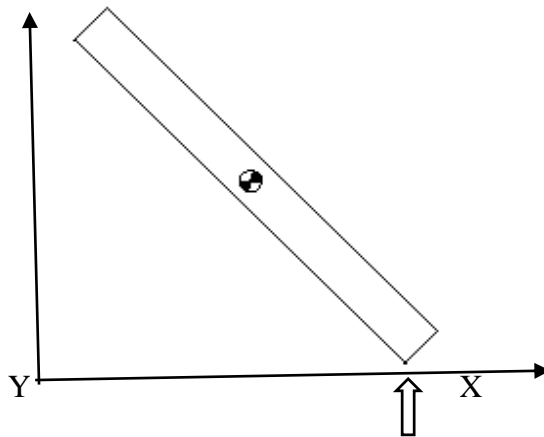


Figura 6.5 – Queda com translação e rotação

O momento em relação ao eixo que passa pelo centro de massa do corpo é obtido através da seguinte fórmula.

$$M = I_{cg}\alpha \quad (\text{eq. 6.25})$$

Onde  $I_{cg}$  = é o momento de inércia do protótipo em relação ao eixo z e que passa pelo centro de massa, seu valor foi retirado do programa Solidworks.  $I_g = I_z = 0.0072336954 = 0.007 \text{ kgm}^2$ .

É possível obter o momento em relação ao referencial inercial colocado no solo, para isso se faz necessário a utilização do teorema dos eixos paralelos dado por:

$$I = I_{cg} + md^2 \quad (\text{eq. 6.26})$$

Onde

$I_{cg}$  = É o momento de inércia do protótipo em relação ao eixo z e que passa pelo centro de massa

m = massa do corpo

d = distância entre os eixos paralelos z e z'

O componente tangencial da aceleração de um ponto (P) qualquer do corpo em relação ao seu centro de massa é dado por

$$a_{Pt} = \alpha r_P \quad (\text{eq. 6.27})$$

Onde

$\alpha$  = É o valor da aceleração angular imposta pelo operador no momento do lançamento

$r_P$  = É a distância do ponto P ao centro de massa

O sentido do componente tangencial da aceleração será o mesmo da aceleração angular  $\alpha$

O componente normal da aceleração de um ponto (P) qualquer do corpo em relação ao seu centro de massa é dado por

$$a_{Pn} = \omega^2 r_P \quad (\text{eq. 6.28})$$

Onde

$\omega = \dot{\theta}$  é o valor da velocidade angular imposta pelo operador no momento do lançamento

O sentido do componente normal da aceleração será sempre apontado para o centro da trajetória.

### 6.3.3 Quantidade de movimento e momento angular

A quantidade de movimento de um corpo rígido é determinada somando-se vetorialmente as quantidades de movimento para todos os pontos do corpo. Isto é:

$$L = \sum m_i v_i \quad (\text{eq. 6.29})$$

Essa equação pode ser reescrita como

$$L = m v_g \quad (\text{eq. 6.30})$$

Onde

$v_g$  é a velocidade do centro de massa

O momento angular de um corpo em relação ao seu centro de massa pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$H_g = I_g \omega \quad (\text{eq. 6.31})$$

Onde

$I_g$  = Momento de inércia do corpo em relação ao seu centro de massa

$\omega$  = Velocidade angular imposta pelo operador no momento do lançamento

Vale lembrar que a quantidade de movimento e o momento angular podem ser conservados, logo.

$$\left( \sum \text{quantidade de movimento do sistema} \right)_1 = \left( \sum \text{quantidade de movimento do sistema} \right)_2$$

$$\left( \sum \text{momento angular do sistema} \right)_1 = \left( \sum \text{momento angular do sistema} \right)_2$$

### 6.3.4 Corpo rígido em impacto no solo

Pode-se definir o coeficiente de restituição, para a colisão de dois objetos, é definido como:

$$e = \frac{v'_b - v'_a}{v_b - v_a} \quad (\text{eq. 6.32})$$

Onde

$v'_a$  é a velocidade escalar final do primeiro objeto após o impacto

$v'_b$  é a velocidade escalar final do segundo objeto após o impacto

$v_a$  é a velocidade escalar inicial do primeiro objeto antes do impacto

$v_b$  é a velocidade escalar inicial do segundo objeto antes do impacto

Para um objeto quicando sobre outro objeto estacionário, tal como o chão:

$$e = \frac{v'_f}{v_i} \quad (\text{eq. 6.33})$$

Onde

$v_f$  é a velocidade escalar do objeto após o impacto

$v_i$  é a velocidade escalar do objeto antes do impacto

O coeficiente também pode ser encontrado com:

$$e = \sqrt{\frac{h}{H}} \quad (\text{eq. 6.34})$$

$h = \acute{E}$  a altura máxima atingida em um dado ressalto

$H = \acute{E}$  a altura máxima atingida no ressalto anterior ao considerado para  $h$

O coeficiente de restituição ( $e$ ) varia de acordo com o tipo de solo. Para comprovar isso está disponibilizada no Apêndice C a descrição de um teste com 10 pedras de diferentes tamanhos e formatos submetidas às mesmas condições de contorno iniciais e que colidiram em queda livre com quatro diferentes tipos de solo. Os dados foram extraídos da referência [24].

Os experimentos [24] indicam que os corpos alongados podem ter um comportamento inesperado podendo quicar para direções inesperadas e consequentemente ter valores maiores do coeficiente de restituição.

Em função da forma alongada do protótipo, ao se ter o contato com o solo o comportamento dos rebotes vai resultar em uma resposta caótica, o que dificulta a obtenção de um valor único do coeficiente de restituição. Valores aproximados podem

ser obtidos através de um estudo experimental e estatístico, porém este aspecto não é tratado neste projeto de fim de curso.

### 6.3.5 Modelagem do impacto sem rotação

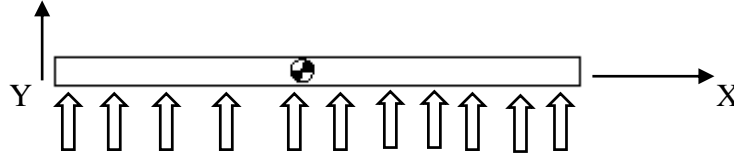


Figura 6.6 – Queda com translação e sem rotação

Nesta primeira modelagem pode-se analisar o caso em que o robô caia paralelamente ao solo. Sabe-se que o protótipo sofrerá um impacto parcialmente elástico pois parte da energia se perderá em forma de deformação, porém como o protótipo é composto por diferentes materiais a melhor forma de obter o seu coeficiente de restituição ( $e$ ) se dá por meio de experimentação.

No procedimento experimental o robô deverá ser solto da altura desejada,  $h_{antes}$ , sua queda filmada por câmera de alta velocidade e a sua altura após a colisão,  $H_{depois}$ , calculada através da comparação das sobreposições de imagens com valores associados a uma régua posicionada no plano de fundo da imagem. O coeficiente de restituição do robô é dado através da seguinte fórmula.

$$e = \sqrt{\frac{h_{antes}}{H_{depois}}} \quad (\text{eq. 6.35})$$

Pode-se estimar a força de impacto do robô no solo utilizando a equação 6.36, admitindo-se um solo muito rígido. Desprezando as forças de arrasto e empuxo, e assumindo uma pequena deformação elástica da placa de EVA ( $d$ ) da ordem de décimos de milímetro. Lembrando que somente com testes é possível ter dados mais aproximados.

$$F_{\text{impacto média}} = \frac{\frac{1}{2}mv^2_f}{d} \quad (\text{eq. 6.36})$$

Substituindo a equação 6.21 na 6.36, assumindo a altura da queda como a máxima de operação (3m) e assumindo uma deformação de 0,5 mm, tem-se que:



$$F_{\text{impacto média}} = \frac{\frac{1}{2}mv^2_f}{d} = \frac{\frac{1}{2} \times 3,3 \times (2 \times 9,81 \times 3)}{0,5 \times 10^{-3}} = 194238 \text{ N} \quad (\text{eq. 6.37})$$

Para o dimensionamento será considerado apenas 70% do valor da força de impacto média, visto que não há a possibilidade de apenas uma mola absorver todo o impacto devido à geometria do projeto. Não se pode esquecer de subtrair a força de pré-tensão da mola (13733,2 kgf).

Nos cálculos apresentados nas planilhas do item 6.5 e apêndice D, a força agindo na mola mais solicitada, que será usada no dimensionamento, vale:

$$F_{\text{mola}} = 0,7 \times F_{\text{impacto média}} - F_{\text{pré-tensão}} = 0,7 \times 194238 - 134585 = 1381,6\text{N ou } 140,8 \text{ kgf}$$

### 6.3.6 Modelagem do impacto com rotação

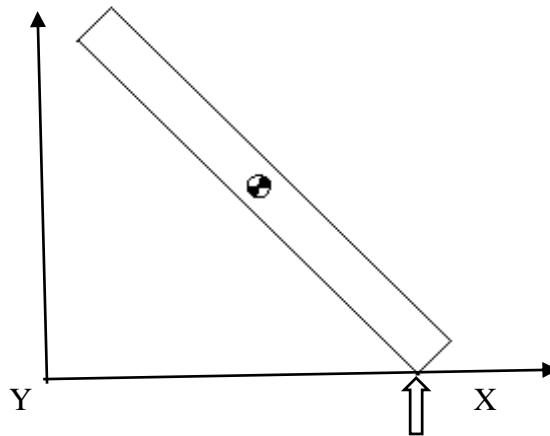


Figura 6.7 – Queda com rotação

A quantidade de movimento linear neste caso será a mesma do caso anterior, basta portanto determinar a quantidade de momento angular através da seguinte fórmula.

$$H_g = I_g \omega \quad (\text{eq. 6.38})$$

Neste caso o momento de inércia ( $I_g$ ) a ser utilizado será o do eixo z

$$I_z = 0.007 \text{ kgm}^2$$

A velocidade angular do corpo irá variar para cada lançamento portanto cada caso terá o seu momento de inércia angular.

$$H_g = 0,007\omega \quad (\text{eq. 6.39})$$

Como a área de contato com o solo no momento do impacto será menor, o protótipo receberá uma pressão muito maior em relação ao caso sem rotação.

#### 6.4 Cálculo do Dimensionamento das Molas

Nesta seção do projeto são apresentados todos os cálculos referentes ao dimensionamento das molas utilizadas no amortecimento do protótipo. Para o auxílio desta tarefa foi utilizado uma tabela do Excel com as fórmulas para molas helicoidais de compressão retiradas dos livros “Molas pro-tec” [13] e “Shigley elementos de máquinas” [17] e apresentadas a baixo.

Energia cedida pelo peso à mola é dada por:

$$T = m_{robo} h_{máxima} \quad (\text{eq. 6.40})$$

Energia máxima cedida pelo peso à mola é dada por:

$$T_{máxima} = m_{robo} h_{máxima} \quad (\text{eq. 6.41})$$

Cálculo da capacidade da mola:

$$P = \frac{2T}{f} \quad (\text{eq. 6.42})$$

ou

$$P = \frac{\pi d^3 \tau_t}{16 r} \quad (\text{eq. 6.43})$$

Onde:

$P = 1379,84\text{N}$  ou  $140,8 \text{ kgf}$

$f =$  flecha

$d =$  diâmetro do fio da mola

$\tau_t =$  tensão

$r =$  raio da mola

Para a situação de capacidade máxima é necessário utilizar  $T_{máxima}$

Cálculo da flecha:

$$f = \frac{64 n r^3 P}{d^4 G} \quad (\text{eq. 6.44})$$

Ou

$$f = \sqrt{\frac{128 n r^3 T}{d^4 G}} \quad (\text{eq. 6.45})$$

Onde:

n = número de espiras

G = propriedade do material

Para a situação de flecha máxima é necessário utilizar  $T_{máxima}$

Cálculo da tensão:

$$\tau_t = \frac{16 P r}{\pi d^3} \quad (\text{eq. 6.46})$$

Para obter o comprimento da mola quando fechada, livre ou número de espiras ativas é necessário saber o tipo de mola que se está trabalhando como mostrado na figura 28, pois as fórmulas variam de caso a caso.

Cálculo da inclinação da hélice  $\beta$ :

$$\text{tg } \beta = \frac{p}{2 \pi r} \quad (\text{eq. 6.47})$$

Onde:

p = passo com a mola carregada:

r = raio da mola

Cálculo do comprimento do fio:

$$l = \frac{n 2 \pi r}{\cos \beta} \quad (\text{eq. 6.48})$$

Cálculo do comprimento para uma volta completa:

$$l = \frac{\pi^2 G d^4}{16 P r} \quad (\text{eq. 6.49})$$

Análise de Tensões

Cisalhamento simples:

$$\tau_c = \frac{F}{A} \quad (\text{eq. 6.50})$$

Cisalhamento devido à torção

$$\tau_t = \frac{T \cdot y}{J} \quad (\text{eq. 6.51})$$

Tensão máxima

$$\tau_{m\acute{a}x} = \tau_t + \tau_c \quad (\text{eq. 6.52})$$

Índice de curvatura da mola

$$c = \frac{D}{d} \quad (\text{eq. 6.53})$$

Logo:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{8 F D}{\pi d^3} \cdot \left( \frac{0.5}{c} + 1 \right) \quad (\text{eq. 6.54})$$

Vale ressaltar que o índice de curvatura recomendado deve estar entre 5 e 10.

Dimensionamento levando em consideração as constantes

Fator devido ao esforço cortante -  $k_s$

$$k_s = \left( \frac{0.5}{c} + 1 \right) \quad (\text{eq. 6.55})$$

Fator devido a curvatura da mola (concentração de tensões) -  $k_c$

Fator WAHL -  $k_w$

$$k_w = k_s \cdot k_c = \frac{4 \cdot c - 1}{4 \cdot c - 4} + \frac{0.615}{c} \quad (\text{eq. 6.56})$$

Tensão admissível

$$Su_t = \frac{A}{d^m} \quad (\text{eq. 6.57})$$

Onde:

A e m são encontrados na tabela da figura 29.

$$S_y = 0,75 \times Su_t \quad (\text{eq. 6.58})$$

$$SS_y = 0,577 \times S_y \quad (\text{eq. 6.59})$$

Constante da mola K:

$$K = \frac{G \cdot d}{8 \cdot c^3 \cdot N_a} \quad (\text{eq. 6.60})$$

Onde:

$N_a$  = Número de espiras ativas

A fadiga não é um fator crítico neste projeto. Porém com o intuito de rebuscar o programa de molas, suas fórmulas também foram incluídas.

Fadiga em molas:

Vida infinita

$$\frac{1}{cS_{Sse}} = \frac{\tau_a}{S_{Se}} + \frac{\tau_m}{S_{Sy}} \quad (\text{eq. 6.61})$$

$$\tau_a = k_w \frac{8 \cdot F_a \cdot D}{\pi \cdot d^3} \quad (\text{eq. 6.62})$$

$$F_a = \frac{F_{m\acute{a}x} - F_{m\acute{i}n}}{2} \quad (\text{eq. 6.63})$$

$$\tau_m = k_w \frac{8 \cdot F_m \cdot D}{\pi \cdot d^3} \quad (\text{eq. 6.64})$$

$$F_a = \frac{F_{m\acute{a}x} + F_{m\acute{i}n}}{2} \quad (\text{eq. 6.65})$$

$$S_{Se} = k_a \times k_b \times k_c \times k_d \times k_e \times S_{S'e} \quad (\text{eq. 6.66})$$

$$S_{S'e} = \begin{cases} 465 \text{ MPa} = \text{molas forjadas e/ou jateadas com esferas} \\ 310 \text{ MPa} = \text{molas } \mathbf{N\tilde{A}O} \text{ forjadas e/ou } \mathbf{N\tilde{A}O} \text{ jateadas} \end{cases}$$

$$k_a = k_b = 1 \text{ (incluído em } S_{S'e} \text{)}$$

$$k_c = 1 \text{ (incluído em } S_{S'e} \text{)}$$

$$k_c = 1 \text{ (incluído em } S_{S'e} \text{)}$$

$$k_c = 1 \text{ (incluído no fator Wahl)}$$

Frequência crítica da mola

Molas com a extremidades fixas

$$f = 0.5 \cdot \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (\text{eq. 6.67})$$

Molas com a extremidades livre

$$f = 0.25 \cdot \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (\text{eq. 6.68})$$

## 6.5 Programa Excel

Devido ao grande número de fórmulas e variáveis a utilização do Excel para os cálculos se tornou necessária. Na parte inicial do programa é necessário entrar com informações básicas do projeto e da mola, como mostrado na figura 6.1 e como resultado é retornada a deformação sofrida pela mola. É possível também impor uma deformação e ter como resposta o diâmetro mínimo da seção do fio da mola necessário para suportar esta deformação.

d (do fio) [mm]	3,20		Fórmulas e resultados	
D (medio) [mm]	21,80		f (deflexão da mola)	68,53
n (espiras)	25,00			
Peso do robô (kg)	3,30		d em função da deformação imposta	7,81
Altura (mm)	3000,00			
G (material)	8331,08		τ (tensão usando f calculado) (kg/cm <sup>2</sup> )	48,95
T (energia)	990,00			
C(kgf/mm)	3,62		τ (tensão usando f imposto) (kg/cm <sup>2</sup> )	291,68
f (deformação imposta) [mm]	11,50			
Distancia entre faces externas do EVA (mm)	88,00			
Distancia entre faces internas do EVA (mm)	82,00			

Figura 6.8 – Programa para os cálculos referentes a mola

Comprimentos da mola		
<b>Tipo 1</b>		
h (mm)	83,20	
H (mm)	151,73	
p(passo - mm)	5,94	
Inclinação da hélice	0,09	
Comprimento do fio [mm]	1718,63	

Figura 6.9 – Resultados obtidos para mola tipo 1

<b>Tipo 2</b>		
h (mm)	89,60	
H (mm)	158,13	
p(passo - mm)	5,94	
Inclinação da hélice	0,09	<- Arctg desse ângulo
Comprimento do fio	1718,63	

Figura 6.10 – Resultados obtidos para mola tipo 2

<b>Tipo 3</b>		
h (mm)	80,00	
H (mm)	148,53	
p(passo - mm)	5,94	
Inclinação da hélice	0,09	<- Arctg desse ângulo
Comprimento do fio	1718,63	

Figura 6.11 – Resultados obtidos para mola tipo 3

<b>Tipo 4</b>		
h (mm)	86,40	
H (mm)	154,93	
p(passo - mm)	5,94	
Inclinação da hélice	0,09	<- Arctg desse ângulo
Comprimento do fio	1718,63	

Figura 6.12 – Resultados obtidos para mola tipo 4

A classificação das molas quanto o seu tipo leva em consideração suas terminações como mostrado na figura 6.13, e essa variação influencia no dimensionamento da mesma. Portanto o programa desenvolvido realiza os cálculos necessários para todos os 4 tipos permitindo assim uma melhor análise do usuário.

Tipo de Extremidade		Número de Espiras		Comprimento da Mola		Passo [mm]
		$N_T = N_a + N_i$		[mm]		
		Total ( $N_T$ )	Inativas ( $N_i$ )	Livre - $L$	Sólido - $H$	
Ponta		$N_a$	0	$p.N_a + d$	$d.(N_a + 1)$	$\frac{L - d}{N_a}$
Esquadro		$N_a + 2$	2	$p.N_a + 3d$	$d.(N_a + 3)$	$\frac{L - 3d}{N_a}$
Ponta Esmerilhada		$N_a + 1$	1	$p(N_a + 1)$	$d.(N_a + 1)$	$\frac{L}{N_a + 1}$
Esquadro e Esmerilhada		$N_a + 2$	2	$p.N_a + 2d$	$d.(N_a + 2)$	$\frac{L - 2d}{N_a}$

Figura 6.13 – Os 4 diferentes tipos de extremidade da mola [18]

Para a realização dos cálculos citados anteriormente são necessárias informações a respeito do material da mola, tais informações são encontradas nas tabelas apresentadas a seguir. Assim como as dimensões da mola selecionada no catálogo de um dos principais fabricantes, levando em consideração os valores obtidos anteriormente.

COEFICIENTES PARA O CÁLCULO DA TENSÃO ADMISSÍVEL DA MOLA				
MATERIAL	No ASTM	diâmetro [mm]	Expoente $m$	A [MPa]
Aço corda de piano	A228	0.1 a 6.5	0.145	2211
Fio temperado e revenido em óleo	A229	0.5 a 12.7	0.187	1855
Mola de fio duro estirado	A227	0.7 a 12.7	0.190	1783
Fio de cromo-vanádio	A232	0.8 a 11.1	0.168	2005
Fio cromo-silício	A401	1.6 a 9.5	0.108	1974
Aço inoxidável	A313	0.3 a 2.5	0.146	1867
		2.5 a 5.0	0.263	2065
		5.0 a 10.0	0.478	2911
Fio fósforo-bronze	B159	0.1 a 0.6	0	1000
		0.6 a 2.0	0.028	913
		2.0 a 7.5	0.064	932

Figura 6.14 – Coeficientes para o cálculo da tensão admissível da mola [18]



*Tabela de diâmetros e propriedades:*

Material	Limite elástico, percentagem da $S_{0.2}$		Diâmetro d, in	E		G	
	Tração	Torção		Mpsi	GPa	Mpsi	GPa
Fio musical A228	65-75	45-60	< 0,032	29,5	203,4	12,0	82,7
			0,033-0,063	29,0	200	11,85	81,7
			0,064-0,125	28,5	196,5	11,75	81,0
			> 0,125	28,0	193	11,6	80,0
Mola endurecida A227	60-70	45-55	< 0,032	28,8	198,6	11,7	80,7
			0,033-0,063	28,7	197,9	11,6	80,0
			0,064-0,125	28,6	197,2	11,5	79,3
			> 0,125	28,5	196,5	11,4	78,6
Revenido a óleo A239	85-90	45-50		28,5	196,5	11,2	77,2
Mola de válvula A230	85-90	50-60		29,5	203,4	11,2	77,2
Cromo-vanádio A231	88-93	65-75		29,5	203,4	11,2	77,2
A232	88-93			29,5	203,4	11,2	77,2
Cromo-silício A401	85-93	65-75		29,5	203,4	11,2	77,2
Aço inoxidável							
A313*	65-75	45-55		28	193	10	69,0
17-7PH	75-80	55-60		29,5	208,4	11	75,8
414	65-70	42-55		29	200	11,2	77,2
420	65-75	45-55		29	200	11,2	77,2
431	72-76	50-55		30	206	11,5	79,3
Bronze-fósforo B159	75-80	45-50		15	103,4	6	41,4
Berílio-cobre B197	70	50		17	117,2	6,5	44,8
	75	50-55		19	131	7,3	50,3
Liga Inconel X-750	65-70	40-45		31	213,7	11,2	77,2

\* Também inclui 302, 304 e 316.  
Nota: Ver Tabela 10-6 para valores de projeto de tensão admissível de torção.

Figura 6.15– Diâmetros e propriedades de materiais [18]

Mola Selecionada	3.20	16.0	28.1	18.9	68.0	7.060	12.2	19.8
			40.5	25.4		4.500		
			58.0	36.0		2.910		
			81.0	49.0		1.980		
			118.0	70.0		1.336		
	20.0	20.0	33.5	18.5	54.50	3.620	16.1	23.9
			48.5	25.9		2.300		
			71.0	37.1		1.490		
			103.0	51.6		1.012		
	25.0	25.0	172.70	73.2	43.70	0.684	21.1	28.9
			41.0	19.1		1.852		
			63.4	26.3		1.178		
			88.0	37.1		0.763		
			127.0	51.6		0.519		
			188.0	73.2		0.350		
			55.5	19.8		0.883		
			83.0	27.4		0.562		
			125.0	38.8		0.364		
			187.0	54.1		0.247		
	32.0	32.0	267.0	77.0	34.20	0.167	27.6	36.4
			79.5	21.2		0.452		
			117.0	29.7		0.288		
	40.0	40.0			27.30		35.6	44.4

Figura 6.16 – Dimensões encontradas no mercado [19]

## 6.6 Outra Forma de Selecionar Molas

Existem outras formas mais rápidas para a seleção de molas, duas delas são apresentadas no livro de Molas da pro-tec [13]. O primeiro método apresentado é através do gráfico da figura 6.17, onde é necessário o conhecimento de duas das 4 variáveis possíveis para selecionar o modelo adequado. As linhas em vermelho indicam as dimensões do diâmetro do arame (3,2 mm) e diâmetro médio da mola (20mm), já as linhas em amarelo representam a flecha por espira (aproximadamente 3,25 mm) e a carga máxima de funcionamento (aproximadamente 30kg).

O segundo método é através da tabela mostrada na figura 6.18 é semelhante ao método anterior. O diâmetro do fio da mola (3,2 mm) não está presente na tabela da figura 6.18 portanto foi escolhido o mais próximo (3,0 mm) e o diâmetro médio destacados em vermelho na figura, com essas dimensões selecionadas a tabela fornece os valores da carga de funcionamento (24,4 kg) e flecha da mola como um todo (19,7 mm).

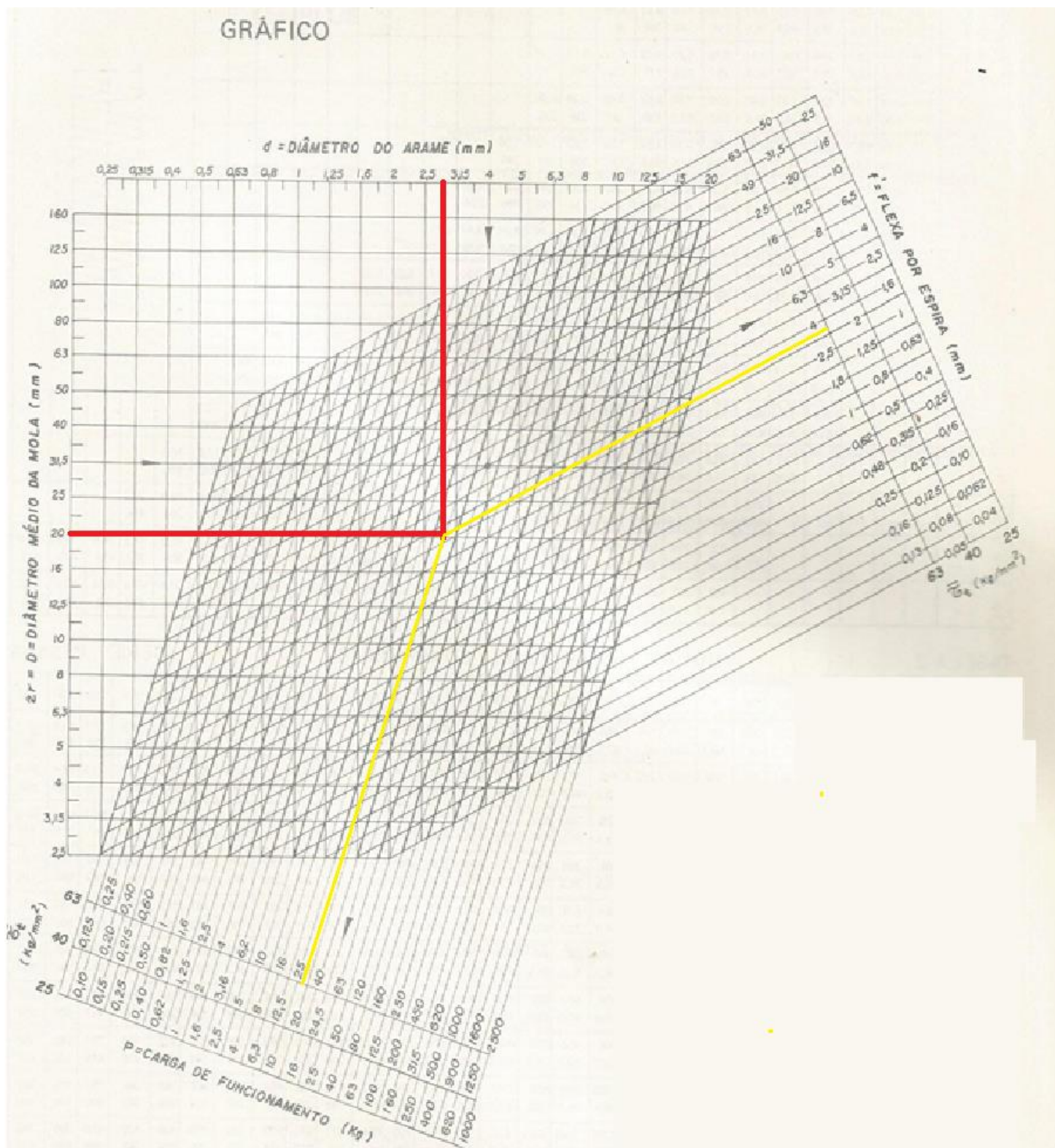


Figura 6.17 – Gráfico para seleção de molas [13]



TABELA 1

## MOLAS HELICOIDAIS COMPRIMIDAS

SÉRIE LEVE

Carga P Kg, flecha f mm para mola helicoidal cilíndrica, com 10 espiras,  $F_s = 40 \text{ Kg/mm}^2$ ,  $G = 8500 \text{ Kg/mm}^2$

Diâmetro médio D helicoidal de mola em mm

d	D	5	6	8	10	13	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80	85	90	100	110	120	130	140	150	160
0,5	P	0,40	0,33	0,25	0,20	0,15	0,13	0,10	0,08	0,07	0,06																	
	f	7,40	10,6	18,8	29,6	49,8	75,5	115	184	266	361																	
0,75	P	1,33	1,11	0,83	0,66	0,51	0,41	0,33	0,27	0,22	0,19	0,17																
	f	4,91	7,10	12,5	19,7	33,3	50,4	78,1	123	177	232	315																
1,0	P	3,14	2,74	1,97	1,57	1,21	0,98	0,78	0,63	0,52	0,45	0,39	0,35															
	f	3,70	5,30	9,45	14,8	24,9	37,8	60,1	92,3	133	181	236	298															
1,5	P		8,84	6,63	5,30	4,08	3,30	2,63	2,12	1,77	1,52	1,33	1,18	1,06														
	f		3,55	6,31	9,96	16,7	25,2	39,4	61,8	88,8	121	158	199	246														
2,0	P		20,9	15,7	12,6	9,68	7,86	6,2	5,03	4,19	3,59	3,14	2,89	2,52	2,29													
	f		2,68	4,72	7,39	12,5	18,9	30,2	46,2	66,6	90,5	118	150	186	224													
2,5	P		40,9	30,7	24,5	18,9	15,3	12,5	9,82	8,18	7,02	6,14	5,46	4,91	4,47	4,10												
	f		2,13	3,78	5,92	10,0	15,1	23,6	36,9	53,3	72,4	94,5	120	148	179	213												
3,0	P																											
	f																											
3,5	P																											
	f																											
4,0	P																											
	f																											
4,5	P																											
	f																											
5	P																											
	f																											
6	P																											
	f																											
7	P																											
	f																											
8	P																											
	f																											

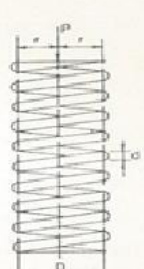


TABELA 2

## MOLAS HELICOIDAIS COMPRIMIDAS

SÉRIE PESADA

d	D	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	
9	P	382	327	287	256	229	208	191	176	164	153	143	127	115	104	95,4	88,0	81,8	76,3	71,5	67,3	63,6	60,2	57,2	54,6	52,1	49,8	47,7	
	f	14,8	20,2	26,4	33,2	41,2	49,7	59,2	69,5	80,5	92,5	105	133	165	199	237	278	322	370	422	475	533	595	660	726	798	872	950	
10	P		449	393	349	314	286	262	242	225	210	197	175	157	143	131	121	112	105	98,2	92,5	87,3	82,7	78,6	74,9	71,5	68,4	65,6	
	f		18,1	23,6	29,2	36,9	44,7	53,2	62,3	72,4	83,2	94,5	120	148	179	213	250	290	332	379	427	479	533	592	652	715	780	840	
11	P			523	465	419	381	349	322	299	279	262	233	209	190	174	161	150	140	131	123	116	111	105	97,7	95,1	91,0	87,2	
	f			21,5	27,2	33,6	40,7	48,3	56,8	65,8	75,6	86,0	109	135	163	194	227	264	302	344	398	435	485	537	592	651	711	775	
12	P				602	542	493	452	414	387	361	339	301	272	246	225	208	194	181	170	160	151	143	135	129	123	118	113	
	f				24,9	30,8	37,3	44,3	52,0	60,5	69,4	78,9	100	123	149	178	208	242	277	316	356	399	445	493	544	597	653	710	
13	P					692	628	576	531	494	461	438	394	346	314	288	265	247	230	216	203	192	182	173	164	157	150	144	
	f					28,4	34,4	40,8	48,0	55,7	64,0	72,7	92,0	114	138	164	192	223	256	291	329	368	410	455	502	550	600	655	
14	P						785	720	664	616	576	540	490	432	392	360	332	308	288	270	254	240	227	216	205	196	188	179	
	f						31,9	38,0	44,6	51,7	59,3	67,5	86,5	106	128	152	178	207	238	270	306	342	381	422	465	510	558	607	
15	P							884	816	758	707	663	590	530	482	442	408	379	354	332	312	294	279	265	253	241	231	222	
	f							35,4	41,7	48,3	55,4	63,0	79,6	98,5	119	142	167	193	222	252	284	319	356	394	434	477	520	567	
16	P								990	919	859	805	715	644	585	536	486	439	402	378	358	339	323	313	293	280	268		
	f								39,1	45,3	52,0	59,2	75,0	92,5	112	133	156	181	208	237	267	299	334	370	408	447	489	532	
17	P									1104	1029	965	859	772	702	644	594	552	515	483	454	429	406	386	366	351	336	322	
	f									42,5	48,9	55,8	70,5	87,0	105	125	147	171	196	222	251	282	314	348	383	420	450	500	
18	P										1222	1145	1040	916	833	764	705	654	611	573	539	506	482	458	436	416	398	382	
	f										46,2	52,5	66,5	82,2	99,4	118	139	161	185	212	238	266	296	326	358	393	435	473	
19	P											1347	1198	1078	980	898	825	770	719	674	634	596	567	539	513	489	469	449	
	f											50,0	63,2	78,0	94,5	112	132	153	176	200	225	252	282	312	344	378	413	450	
20	P												1574	1399	1258	1145	1048	969	799	839	787	740	696	662	629	599	572	547	
	f												47,3	59,8	74,0	89,5	106	125	145	166	189	213	240	266	295	326	358	391	425
22	P													1860	1675	1522	1395	1298	1195	1117	1045	985	930	881	837	797	761	728	
	f													43,0	67,2	81,2	96,8	114	132	151	172	194	218	242	269	295	325	355	387
24	P														2179	1975	1810	1672	1552	1448	1356	1277	1207	1143	1087	1035	987	944	905
	f														61,6	74,5	88,7	104	121	139	158	178	200	222	246	272	298	326	355

## 6.7 ANÁLISE DE CUSTOS

Nesta etapa será feita uma análise dos custos estimados, em Reais, envolvidos para a fabricação do protótipo contabilizando os valores a serem gastos em matéria prima e componentes a serem comprados. Os custos relacionados a serviços de usinagem e montagem, além da interface operador-máquina não foram incluídos.

<b>Matéria prima</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor gasto R\$</b>
Tapete tatame EVA	2	17,60
Chapa de alumínio	1	90,00
Metalon 30x20x1,2 (6m)	1	35,08
Metalon 30x20x2 (6m)	1	53,40
Cantoneira 32x32 (mm)	1	15,00
Cantoneira em L para fixação	Pacote com 50	37,99
Tarugo M3 (Aço 1020)	1	30,00
Tarugo M4 (Aço 1020)	1	30,00
Chama polímero UHMW	1	50,00

<b>Componentes comprados</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor gasto R\$</b>
Kit motor DC + roda para robô	2	65,80
Servo motor Futaba S148	1	46,69
Arduino Uno R3 Rev3 Atmega 328	1	29,99
Parafusos M3	10	10,00
Parafusos M2	10	10,00
Porcas M3	10	1,00
Porcas M2	10	1,00
Arruelas	20	1,00
Arruelas	20	1,00
Câmeras	2	349,00 (cada)
Baterias	5	5,33 (cada)
Molas do gatilho	1	9,00
Molas do amortecedor	2	12,50

**VALOR TOTAL ESTIMADO = R\$ 1284,20**

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido resultou em um projeto mecânico de uma plataforma robótica móvel com sistema de amortecimento, com o objetivo de auxiliar no desbravamento de ambientes remotos, hostil ou de difícil acesso captando imagens e enviando ao operador.

O resultado final do trabalho foi de um robô compacto com 227 mm de largura, 230 mm de comprimento e 88 mm de espessura, pesando 3,3 kg, altura máxima de funcionamento de 3 m, duas câmeras captando imagens em HD, dois motoredutores acoplado nas rodas, um servo motor, uma placa de arduino uno além das baterias.

O projeto possui como característica principal a concepção de um robô capaz de absorver o impacto de sua queda quando lançado, se locomover, captar e transmitir imagens. Para o funcionamento correto do protótipo é necessário respeitar a sequência de funcionamento descrita no capítulo 3 deste projeto.

A originalidade da concepção proposta vem do fato de apresentar um sistema de absorção de impacto onde as partes sensíveis se encontram protegidas no momento do impacto com o solo e, através de um mecanismo apropriado, tem-se o desacoplamento entre a parte de locomoção e a de amortecimento, permitindo dessa forma que o equipamento possa se deslocar e transmitir imagens em tempo real.

A fase inicial e mais delicada de concepção da máquina deu-se quanto a maneira que a energia cinética e potencial gravitacional da queda da plataforma seria absorvida, necessitando a garantia de que o esforço não fosse passado para a estrutura interna do protótipo podendo a vir danificar seus componentes internos assim como seu funcionamento. Esses desafios foram resolvidos com a escolha de uma mola adequada ao seu peso e a altura máxima de trabalho, além da utilização de placas de EVA que funcionam como pequenos amortecedores e são fáceis de serem moldadas para abranger a área necessária.

As análises geométricas e dimensionais realizadas nas seções anteriores embasam a escolha e a aplicação de cada peça do robô, e os desenhos técnicos do anexo B auxiliam na montagem e fabricação do protótipo.

Por fim, com todos os desenhos de fabricação realizados e produtos comerciais especificados, a construção deste robô é tecnicamente viável. Além disso, grande parte de seus componentes podem ser adquiridos diretamente no mercado. Os itens que precisam ser fabricados necessitam de pouca matéria prima em relação a quantidade mínima possível de ser comprada, facilitando a fabricação de peças sobressalentes.

Para projetos futuros, a fabricação de um protótipo para teste se torna fundamental pois permitirá experimentos e análises mais precisas. Assim, os testes no protótipo irão nortear a otimização para a melhoria de desempenho como o aumento da altura máxima de queda e velocidade de locomoção.

Outro ponto a ser analisado no projeto seria a inclusão de câmeras térmicas, detectores de radiação e fumaça. Dessa forma, o robô será capaz de realizar a aquisição de diferentes tipos de parâmetros e a atuação em diferentes ambientes hostis ao homem.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] História da robótica. Disponível em: <[http://www.citi.pt/educacao\\_final/trab\\_final\\_inteligencia\\_artificial/historia\\_da\\_robotica.html](http://www.citi.pt/educacao_final/trab_final_inteligencia_artificial/historia_da_robotica.html)> Acesso em 07/09/2017 18:28:40
- [2] Camargo, Dayana e Silva, Mario. Artigo científico. Fundamentos da Robótica (Outubro 2010)
- [3] Tronco Mario Luiz. Robôs industriais. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2092683/mod\\_resource/content/1/Aula\\_2\\_Rob%C3%B3tica\\_2016.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2092683/mod_resource/content/1/Aula_2_Rob%C3%B3tica_2016.pdf)> Acesso em 07/05/2017 12:42:33
- [4] Robôs de serviço. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/3291/1/22%20UNAGUI.pdf>> Acesso em 07/05/2017 14:17:21
- [5] General Robots DOGO. Disponível em: <<http://www.grobotics.com/dogo-members>> Acesso em 24/01/2017 16:15:10
- [6] Throwbot XT com captação de áudio. Disponível em: <<http://www.reconrobotics.com/products/throwbot-xt/>> Acesso em 24/01/2017 15:38:29
- [7] SandFlea – Pula pequenos edifícios num único salto. Disponível em <[http://www.bostondynamics.com/robot\\_sandflea.html](http://www.bostondynamics.com/robot_sandflea.html)> Acesso em 08/09/2016 18:20:35
- [8] Câmera LifeCam HD-3000 da Microsoft. Disponível em <<https://www.microsoft.com/accessories/pt-br/products/webcams/lifecam-hd-3000/t3h-00011>> Acesso em 13/05/2017 as 13:53:10
- [9] Roland SIEGWSRT E ILLAH R. NOURBAKHS: Introduction to Autonomous Mobile Robots
- [10] Kit motor DC + roda para Robô. Disponível em <<http://www.baudaeletronica.com.br/kit-motor-dc-roda-para-robo.html?gclid=Cj0KEQiAsrnCBRCTs7nqwrn6pcYBEiQAcQSznPcdzDNleDwSq12bHSJdxBHJbjLescWSwotwVXda5AAaAiUW8P8HAQ>> Acesso em 08/09/2016 20:22:16
- [11] Futuba S148 – Servo Standard Precision. Disponível em <



- <http://www.servodatabase.com/servo/futaba/s148>> Acesso em 09/09/2016 19:38:19
- [12] Sistemas mecânicos – Molas. Disponível em <[https://www.ime.usp.br/~oda/contents/01Matem%E1tica/01Sistemas%20Din%E2micos/04\\_Elem\\_Sist\\_Mec.pdf](https://www.ime.usp.br/~oda/contents/01Matem%E1tica/01Sistemas%20Din%E2micos/04_Elem_Sist_Mec.pdf)> Acesso em 05/01/2017
- [13] ENG. IND. MEC. Francesco Provenza: Molas pro-tec ed 1991. E. F. Provenza.
- [14] O que é um Arduino e o que pode ser feito com ele? Disponível em <<http://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2013/10/o-que-e-um-arduino-e-o-que-pode-ser-feito-com-ele.html>> Acesso em 05/01/2017
- [15] Bateria 5000mAh Elite NiMh. Disponível em <[http://www.robotcombat.com/products/battery\\_build.html](http://www.robotcombat.com/products/battery_build.html)> Acesso em 13/05/2017 as 13:53:10
- [16] Propriedades Tribológicas. Disponível em <[http://ctborracha.com/?page\\_id=1467](http://ctborracha.com/?page_id=1467)> Acesso em 16/12/2016 14:19:10
- [17] Shigley, J. E; Mishke, C. R.; Projeto de Engenharia Mecânica, Bookman, 7ª edição, 2005.
- [18] Filho, F. M. Notas de aula Elementos de máquinas I – Molas Mecânicas. Universidade Federal do Rio de Janeiro 2015.
- [19] Catálogo de molas de compressão. Disponível em <<http://www.screwcenterbrooklin.com.br/molas/compressao/compressao.htm>> Acesso em 24/01/2017 as 16:47:09
- [20] Mucheroni F. Mario, Dinâmica Vetorial – Escola de Engenharia de São Carlos
- [21] Lançamento vertical. Disponível em <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/movimento-queda-livre-lancamento-vertical.htm>> Acesso: 20/05/2017 as 11:36
- [22] Aladim Metais – fornecedor de tubos quadrados, disponível em <<http://www.aladimmetais.com.br/tubo-retangular-ct-123-389334.htm>> Acesso 08/05/2017
- [23] Nova plásticos – fornecedor de produtos e peças feitos de polímeros, disponível em <<http://novaplasticos.ind.br/site/u-h-m-w/>> Acesso 08/05/2017
- [24] Coefficient of restitution for rigid body dynamics modelling from onsite experimental data, disponível em <[https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1308\\_82\\_Basson/](https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1308_82_Basson/)>

## Anexo A – Catálogos

### A.1 Molas de compressão

d(mm)	Dm(mm)	L0(mm)	L1(mm)	P1(kgf)	C(kgf/mm)	Diâmetro (mm)	
						eixo	furo
0.25	2.0	3.9	2.0	0.26	0.135	1.5	2.6
		5.6	2.6		0.086		
		8.3	3.6		0.055		
		11.8	5.0		0.038		
		17.4	7.0		0.025		
	2.5	5.2	2.0	0.22	0.069	1.9	3.1
		7.6	2.6		0.044		
		11.4	3.6		0.028		
		16.6	5.0		0.019		
		23.9	8.0		0.013		
	3.2	7.1	2.0	0.17	0.033	2.5	4.0
		10.9	2.8		0.021		
		16.0	3.8		0.014		
		24.2	6.0		0.009		
		35.8	7.5		0.006		
0.32	1.6	3.4	2.5	0.62	0.706	1.0	2.2
		4.7	3.3		0.450		
		6.7	4.6		0.291		
		9.1	6.0		0.198		
		13.4	8.8		0.134		
	2.0	3.9	2.5	0.53	0.362	1.4	2.6
		5.6	3.2		0.230		
		8.1	4.6		0.149		
		11.2	6.0		0.101		
		16.6	8.8		0.068		
	2.5	4.9	2.5	0.44	0.185	1.9	3.1
		7.0	3.3		0.118		
		10.4	4.6		0.076		
		14.5	6.1		0.052		
		20.9	8.8		0.035		
	3.2	6.6	2.5	0.36	0.088	2.4	4.0
		9.7	3.3		0.056		
		14.6	4.6		0.036		
		20.7	6.3		0.025		
		30.0	8.9		0.017		
	4.0	9.0	2.6	0.29	0.045	3.2	4.8
		13.5	3.5		0.029		
		19.8	4.6		0.019		
		29.0	6.7		0.013		
		41.7	9.5		0.009		
0.40	2.0	3.7	2.9	0.70	0.883	1.3	2.8
		5.1	3.8		0.562		
		7.0	5.1		0.364		
		10.0	7.2		0.247		
		14.1	9.9		0.167		
	2.5	4.4	2.9	0.68	0.452	1.8	3.3
		6.3	3.9		0.288		
		9.1	5.4		0.186		
		12.9	7.5		0.126		
		18.5	10.6		0.085		
	3.2	5.8	3.0	0.60	0.215	2.5	4.0
		8.4	4.0		0.137		
		12.3	5.5		0.089		
		17.5	7.5		0.061		

	4.0	25.5	10.7	0.50	0.041	3.2	5.0
		7.5	3.0		0.110		
		11.2	4.1		0.070		
		16.3	5.8		0.045		
		24.4	8.0		0.031		
		35.3	11.4		0.021		
	5.0	10.5	3.2	0.41	0.057	4.1	6.0
		16.0	4.5		0.036		
		23.8	6.4		0.024		
		34.6	9.0		0.016		
		52.4	12.8		0.010		
0.50	2.5	4.6	3.7	0.98	1.104	1.7	3.4
		6.1	4.7		0.702		
		8.7	6.5		0.444		
		11.9	9.0		0.302		
		17.6	12.8		0.204		
	3.2	5.5	3.7	0.95	0.526	2.4	4.1
		8.1	5.1		0.335		
		11.7	7.1		0.217		
		16.2	9.8		0.147		
		23.5	14.0		0.100		
0.50	4.0	7.0	3.7	0.88	0.269	3.2	5.0
		10.4	5.1		0.171		
		15.0	7.1		0.111		
		21.5	9.8		0.075		
		31.2	14.0		0.051		
	5.0	9.6	3.9	0.76	0.138	4.0	6.2
		14.2	5.4		0.088		
		21.1	7.6		0.057		
		30.3	10.6		0.039		
		44.3	15.1		0.029		
	6.3	13.3	4.4	0.62	0.069	5.3	7.5
		20.0	6.2		0.044		
		30.8	8.7		0.028		
		44.8	12.2		0.019		
		65.0	17.4		0.013		
0.63	3.2	5.9	4.4	2.00	1.327	2.3	4.2
		8.1	5.7		0.844		
		11.4	7.7		0.546		
		15.7	10.3		0.371		
		22.7	14.7		0.251		
	4.0	7.0	4.4	1.63	0.679	3.0	5.0
		9.6	5.8		0.432		
		14.0	8.2		0.280		
		20.0	11.3		0.190		
		29.0	16.2		0.128		
	5.0	8.7	4.5	1.47	0.348	3.9	6.1
		12.5	5.8		0.221		
		18.2	8.2		0.143		
		26.0	11.3		0.097		
		38.5	16.2		0.066		
	6.3	11.4	4.6	1.18	0.174	5.0	7.6
		16.8	6.2		0.111		
		25.3	8.9		0.072		
		36.0	12.3		0.049		
		53.4	17.7		0.033		
	8.0	16.3	5.1	0.95	0.085	6.8	9.4
		24.7	7.1		0.054		
		37.3	10.2		0.035		
		53.9	14.3		0.024		
		80.0	20.6		0.016		
0.80	4.0	7.4	5.7	3.00	1.766	2.8	5.3
		10.2	7.8		1.124		

		14.1	10.2		0.727		
		18.6	13.5		0.494		
		28.0	19.1		0.334		
	5.0	8.5	5.7	2.50	0.904	3.8	6.3
		12.0	7.6		0.575		
		17.4	10.9		0.372		
		25.0	15.1		0.253		
		36.1	21.5		0.171		
	6.3	10.8	5.7	2.30	0.452	5.0	7.7
		15.7	7.9		0.288		
		23.3	11.6		0.186		
		33.2	15.6		0.127		
		48.2	21.5		0.086		
	8.0	14.7	6.1	1.90	0.221	6.6	9.6
		22.0	9.0		0.140		
		32.9	13.5		0.091		
		47.3	17.5		0.062		
		69.0	23.8		0.042		
	10.0	20.2	6.9	1.50	0.113	8.6	11.6
		30.6	9.8		0.072		
		46.2	14.3		0.047		
		66.4	19.9		0.032		
		100.0	28.5		0.021		
1.00	5.0	8.5	6.6	4.10	2.207	3.6	6.5
		11.9	9.0		1.405		
		17.1	12.6		0.909		
		24.0	17.4		0.618		
		34.4	24.6		0.418		
	6.3	10.2	7.3	3.20	1.104	4.9	7.8
		14.7	10.1		0.702		
		21.3	14.3		0.454		
		30.2	19.9		0.309		
		43.6	28.3		0.209		
1.00	8.00	12.9	7.3	3.00	0.539	6.5	9.6
		18.8	10.8		0.343		
		27.8	14.3		0.222		
		39.7	19.9		0.151		
		57.7	28.3		0.102		
	10.0	17.4	8.0	2.60	0.276	8.4	11.8
		26.0	11.3		0.176		
		38.8	16.0		0.144		
		56.1	22.4		0.077		
		82.0	32.0		0.052		
	12.5	24.3	9.4	2.10	0.141	10.8	14.4
		36.7	13.4		0.090		
		55.6	19.4		0.058		
		79.9	27.4		0.040		
		107.0	39.4		0.027		
1.25	6.3	12.2	7.5	12.60	2.694	4.7	8.1
		17.5	10.2		1.714		
		25.8	14.5		1.109		
		36.7	20.0		0.754		
		52.7	28.3		0.510		
	8.0	15.0	7.5	9.90	1.316	6.1	9.6
		22.3	10.5		0.837		
		33.1	14.9		0.542		
		47.9	21.0		0.368		
		69.7	30.0		0.249		
	10.0	19.7	7.7	8.10	0.674	8.2	11.9
		29.7	10.8		0.429		
		44.4	15.2		0.277		
		64.0	21.1		0.189		
		93.7	30.0		0.127		

	12.5	27.0	8.2	6.50	0.345	10.6	14.6
		41.3	11.6		0.219		
		62.3	16.5		0.142		
		90.1	23.1		0.097		
		132.9	32.9		0.065		
	16.0	40.2	9.1	5.10	0.164	14.1	18.2
		61.5	12.9		0.105		
		93.5	18.5		0.068		
		136.8	26.0		0.046		
		201.8	37.3		0.031		
1.60	8.0	15.0	9.5	20.10	3.651	5.9	10.1
		21.5	12.6		2.256		
		30.8	17.9		1.475		
		44.0	24.8		0.994		
		63.5	35.2		0.663		
	10.0	18.8	9.7	16.10	1.767	7.9	12.1
		27.0	13.2		1.165		
		39.7	18.9		0.744		
		57.0	26.5		0.503		
		82.4	37.9		0.341		
	12.5	24.0	10.0	12.80	0.916	10.0	14.7
		36.0	14.1		0.586		
		53.5	20.1		0.384		
		76.4	28.0		0.257		
		112.1	39.9		0.176		
	16.0	33.0	11.0	10.00	0.436	13.7	18.3
		51.5	15.5		0.279		
		77.0	22.2		0.182		
		112.0	31.2		0.124		
		161.0	44.6		0.083		
	20.0	48.0	12.4	8.00	0.226	17.5	22.5
		72.6	17.6		0.144		
		105.0	25.5		0.093		
		152.0	36.0		0.063		
		224.0	51.8		0.043		
2.00	10.0	18.8	12.0	30.00	4.515	7.5	12.5
		26.5	15.8		2.809		
		39.0	23.0		1.818		
		54.0	30.6		1.236		
		78.0	43.4		0.835		
	12.5	23.3	12.2	24.00	2.260	9.9	15.1
		33.0	16.4		1.438		
		49.3	23.5		0.931		
		71.0	33.0		0.633		
		103.0	47.2		0.428		
	16.0	29.9	12.5	18.80	1.078	13.4	18.6
		44.9	17.7		0.686		
		66.0	25.5		0.444		
		94.5	35.9		0.302		
		140.5	51.4		0.204		
	20.0	40.9	13.6	15.00	0.552	17.1	22.9
		59.5	19.2		0.351		
		90.0	27.6		0.227		
		133.0	38.8		0.155		
		189.0	55.6		0.104		
	25.0	56.0	15.0	12.00	0.283	22.0	27.9
		85.0	21.4		0.180		
		142.0	31.0		0.116		
		188.0	43.8		0.079		
		289.0	63.0		0.053		
2.20	8.8	16.9	13.1	32.00	9.490	6.0	11.6
		23.0	17.7		6.040		
		36.7	27.4		3.490		

	12.8	56.2	41.9	24.30	2.140	10.0	15.6
		21.5	13.1		3.080		
		30.4	17.7		1.960		
		48.7	27.4		1.140		
	21.8	39.1	14.0	15.70	0.624	18.9	24.7
		56.0	19.5		0.397		
2.50	12.5	23.0	14.6	44.30	5.520	9.4	15.6
		33.6	21.0		3.510		
		47.0	28.5		2.270		
		67.0	40.0		1.550		
		95.0	56.0		1.040		
	16.0	27.0	14.6	34.50	2.630	12.9	19.1
		41.0	21.0		1.670		
		59.5	29.3		1.080		
		84.0	41.1		0.740		
		122.3	58.9		0.500		
	20.0	35.5	15.5	27.70	1.350	16.8	23.2
		52.0	21.9		0.860		
		78.0	31.5		0.550		
		113.5	44.3		0.380		
		161.5	63.6		0.250		
	25.0	46.5	16.8	22.10	0.690	21.6	28.4
		71.0	24.0		0.440		
		107.0	34.8		0.284		
		156.0	49.2		0.193		
		233.0	70.8		0.130		
	32.0	71.9	19.3	17.30	0.329	28.3	35.7
		108.0	27.9		0.209		
		160.0	41.0		0.135		
		237.0	58.1		0.092		
		350.0	83.9		0.062		
2.80	11.2	21.0	16.4	49.00	12.070	7.8	16.4
		28.7	22.3		7.680		
		45.9	34.9		4.450		
		71.2	53.3		2.730		
	17.2	27.2	16.4	36.00	3.330	13.8	20.6
		39.5	22.5		2.120		
		63.0	34.9		1.230		
	27.2	45.5	17.9	24.50	0.843	23.7	30.7
		69.6	24.9		0.536		
3.20	16.0	28.1	18.9	68.0	7.060	12.2	19.8
		40.5	25.4		4.500		
		58.0	36.0		2.910		
		81.0	49.0		1.980		
		118.0	70.0		1.336		
	20.0	33.5	18.5	54.50	3.620	16.1	23.9
		48.5	25.9		2.300		
		71.0	37.1		1.490		
		103.0	51.6		1.012		
		172.70	73.2		0.684		
	25.0	41.0	19.1	43.70	1.852	21.1	28.9
		63.4	26.3		1.178		
		88.0	37.1		0.763		
		127.0	51.6		0.519		
		188.0	73.2		0.350		
	32.0	55.5	19.8	34.20	0.883	27.6	36.4
		83.0	27.4		0.562		
		125.0	38.8		0.364		
		187.0	54.1		0.247		
		267.0	77.0		0.167		
	40.0	79.5	21.2	27.30	0.452	35.6	44.4
		117.0	29.7		0.288		

4.00		178.0	42.3		0.186		
		271.0	59.2		0.126		
		401.9	84.5		0.086		
	20.0	34.5	23.0	100.00	8.830	15.3	24.7
		49.8	32.0		5.620		
		70.0	44.0		3.640		
		100.0	62.0		2.470		
		146.0	90.0		1.670		
	25.0	40.8	23.0	80.70	4.520	20.3	29.7
		60.2	32.2		2.880		
		85.5	44.2		1.860		
		126.5	64.5		1.266		
		181.0	92.1		0.855		
	32.0	53.3	24.0	63.10	2.156	27.0	37.0
		77.0	33.3		1.372		
		114.0	47.2		0.888		
		163.0	65.8		0.604		
		238.0	93.6		0.408		
	40.0	70.9	25.2	50.50	1.104	34.8	45.2
		101.0	35.1		0.702		
		154.0	50.0		0.454		
		223.0	69.8		0.309		
		328.5	99.6		0.209		
	50.0	96.0	27.4	40.40	0.565	44.0	56.0
		146.0	38.6		0.360		
		226.0	55.4		0.233		
		334.5	77.8		0.158		
		470.0	111.0		0.107		

## A.2 Metalon



### TUBOS RETANGULARES

Dimensões mm		Espessura mm	Peso Barra 6m kg
30,00	20,00	0,90	4,11
		1,20	5,43
		1,50	6,72
		2,00	8,81
		2,25	9,82
		2,65	11,41
40,00	20,00	0,90	4,96
		1,20	6,55
		1,50	8,13
		2,00	10,69
		2,25	11,94
		2,65	13,91
40,00	30,00	0,90	5,80
		1,20	7,68
		1,50	9,54
		2,00	12,57
		2,25	14,05
		2,65	16,40
50,00	20,00	0,90	5,80
		1,20	7,68
		1,50	9,54
		2,00	12,57
		2,25	14,05
		2,65	16,40
50,00	30,00	0,90	6,65
		1,20	8,81
		1,50	10,95
		2,00	14,45
		2,25	16,17
		2,65	18,89
50,00	40,00	0,90	7,49
		1,20	9,94

Dimensões mm		Espessura mm	Peso Barra 6m kg
50,00	40,00	1,50	12,36
		2,00	16,33
		2,25	18,28
		2,65	21,38
		3,00	24,05
		3,35	26,68
50,00	30,00	3,75	29,64
		4,25	33,28
		1,20	9,94
		1,50	12,36
		2,00	16,33
		2,25	18,28
60,00	40,00	2,65	21,38
		3,00	24,05
		3,35	26,68
		3,75	29,64
		4,25	33,28
		4,75	36,84
60,00	50,00	1,20	11,07
		1,50	13,77
		2,00	18,21
		2,25	20,40
		2,65	23,87
		3,00	26,87
70,00	30,00	3,35	29,83
		3,75	33,17
		4,25	37,27
		4,75	41,31
		1,20	12,29
		1,50	15,18
80,00	40,00	2,00	20,09
		2,25	22,51
		2,65	26,36
		3,00	29,69
		3,35	32,98
		3,75	36,69
80,00	50,00	4,25	41,27
		4,75	45,77
		1,20	11,07
		1,50	13,77
		2,00	18,21

Dimensões mm		Espessura mm	Peso Barra 6m kg
70,00	30,00	2,25	20,40
		2,65	23,87
		3,00	26,87
		3,35	29,83
		3,75	33,17
		4,25	37,27
70,00	40,00	4,75	41,31
		1,20	12,19
		1,50	15,18
		2,00	20,09
		2,25	22,51
		2,65	26,36
70,00	50,00	3,00	29,69
		3,35	32,98
		3,75	36,69
		4,25	41,27
		4,75	45,77
		1,20	13,32
80,00	40,00	1,50	16,59
		2,00	21,97
		2,25	24,63
		2,65	28,85
		3,00	32,51
		3,35	36,12
80,00	50,00	3,75	40,22
		4,25	45,26
		4,75	50,24
		1,20	13,32
		1,50	16,59
		2,00	21,97
80,00	60,00	2,25	24,63
		2,65	28,85
		3,00	32,51
		3,35	36,12
		3,75	40,22
		4,25	45,26
80,00	70,00	4,75	50,24
		6,35	65,65
		1,50	18,00
		2,00	23,85
		2,25	26,74



## Anexo B – Desenho Mecânico

Neste apêndice constam os desenhos de todas as submontagens do robô enumeradas de forma facilitar a localização:

1. Montagem plataforma móvel com sistema de amortecimento
2. Submontagem motor direito
3. Submontagem motor esquerda
4. Elevador
5. Sistema de amortecimento

Também neste apêndice constam os desenhos das peças referenciados na tabela X. Cada desenho contendo o detalhamento da peça, informações a respeito do material e quantidade dela no protótipo todo.

Número da peça	Nome da peça
1	EVA
2	Chapa de rigidez
3	Mola de compressão
4	Suporte da mola A
5	Pino de fixação
6	Bucha do pino
7	Elevador da guia
8	Eixo da guia
9	Copo da mola
10	Barra do gatilho
11	Conector gatilho-suporte E
12	Conector gatilho-suporte D
13	Acionador do gatilho A
14	Acionador do gatilho B
15	Pino trava
16	Hélice do servo motor
17	Extensor da hélice
18	Pino da hélice
19	Fixação do servo motor
20	Cantoneira do elevador
21	Chapa do elevador
22	Metalon E

23	Metalon D
24	Chapa do chassis
25	Bola de apoio
26	Carenagem traseira
27	Carenagem frontal

## Anexo C – Testes para Avaliação do Coeficiente de Restituição [24]









Rock 1: 0.85 kg	Rock 2: 0.56 kg	Rock 3: 1.46 kg	Rock 4: 0.35 kg	Rock 5: 0.73 kg
				
Rock 6: 0.90 kg	Rock 7: 0.49 kg	Rock 8: 2.08 kg	Rock 9: 0.50 kg	Rock 10: 0.53 kg
				

Figura C.1– Pedras utilizadas no teste [24]

(a) Pit Floor	(b) Haul Road	(c) Catch Berm	(d) Hard Rock
			

Figura C.2 – Tipos de solo utilizados no teste[24]

O teste consistiu na queda livre de cada pedra dez vezes em cada tipo de solo, dando um total de 400 resultados. Para melhor extrair os resultados do teste foi utilizada uma câmera e colocado uma escala ao fundo da região de queda possibilitando saber o quão alto cada pedra “quicou”. A figura C.3 relaciona o coeficiente de restituição com a frequência que cada valor ocorreu para cada tipo de solo.

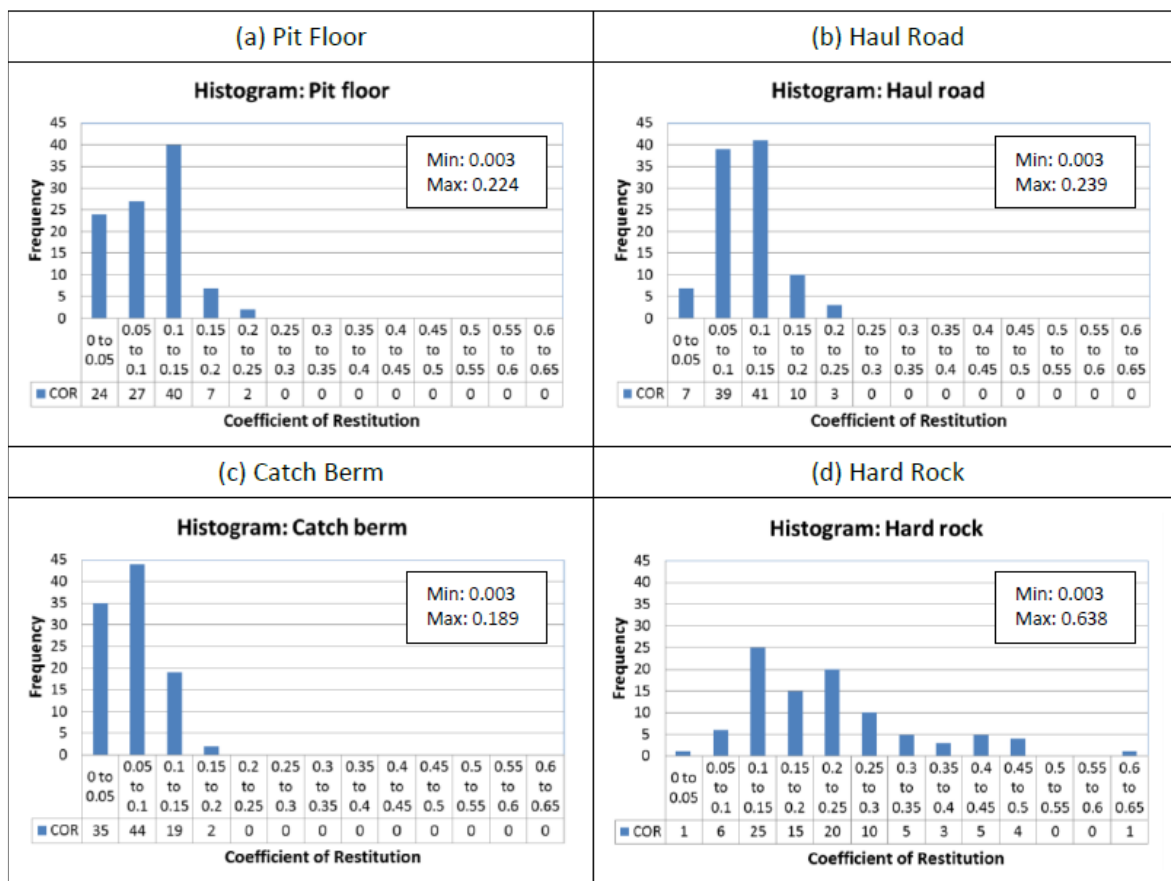


Figura C.3 – Coeficiente de restituição x frequência [24]

Após determinado o coeficiente de restituição para cada um dos 400 lançamentos, foi feita a média para cada pedra em cada um dos solos e plotado em um gráfico relacionando com o peso de cada uma, figura C.4. Estes gráficos mostram que para o primeiro solo o valor do coeficiente de restituição praticamente não varia com o aumento de peso do corpo, porém para os demais solos ocorre um decaimento com o aumento do peso.

O autor do experimento relata que o primeiro quique após a queda irá determinar a região onde o corpo irá parar, porém os corpos alongados podem ter um comportamento inesperado podendo quicar para direções inesperadas e consequentemente ter valores maiores do coeficiente de restituição.

Outro ponto importante que foi observado neste teste foi que os solos mais duros resultaram em rebotes mais altos enquanto que nos solos mais macios eram mais controlados e previsíveis. Em todos os solos tiveram lançamentos em que os rebotes foram muito pequenos para serem observados e essa peculiaridade foi mais frequente no terceiro solo (*catch berm*).

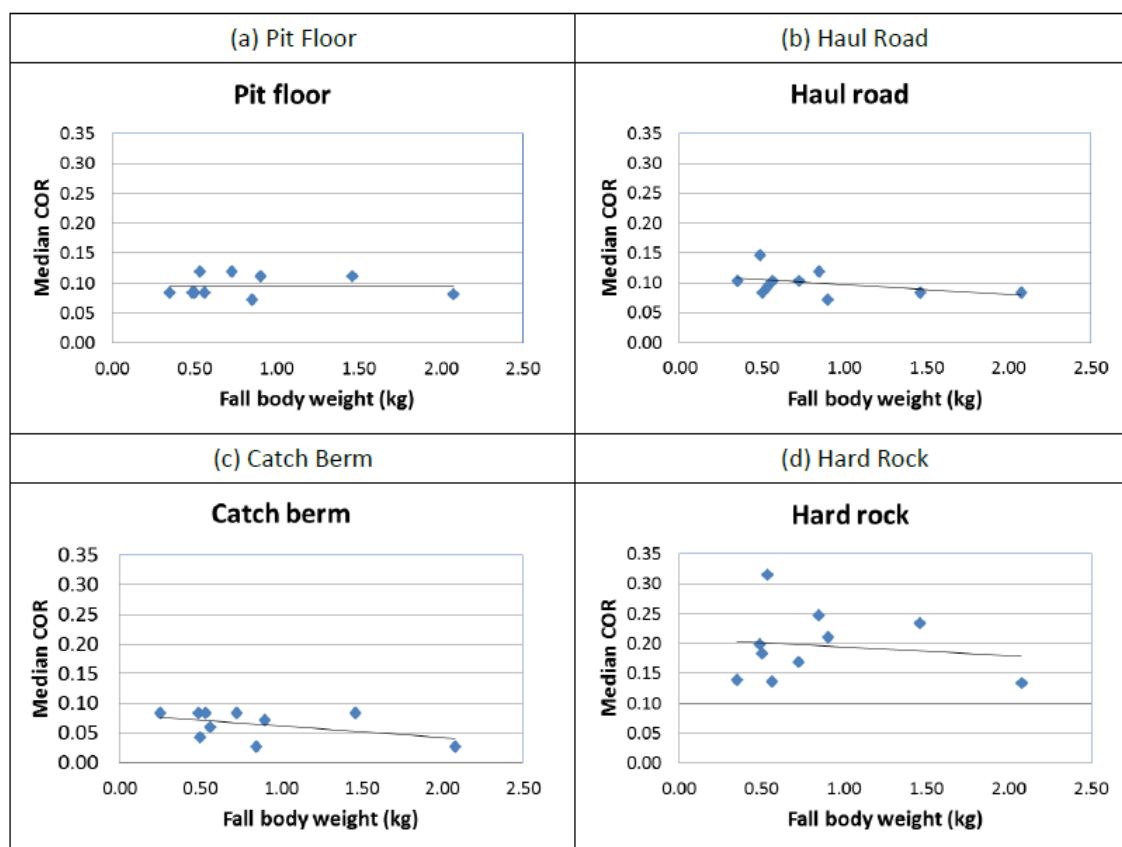


Figura C.4 – Coeficiente de restituição x peso da pedra [24]