



**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**Análise de aspectos de construção, atrito e
comunicação de robô ápode bioinspirado**

Gabriel Baliza Rocha

PROJETO FINAL DE CURSO
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Brasília
2023

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**Análise de aspectos de construção, atrito e
comunicação de robô ápode bioinspirado**

Gabriel Baliza Rocha

Projeto Final de Curso submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação

Orientadora: Profa. Dra. Carla Maria Chagas e Cavalcante Koike

Coorientadora: Profa. Dra. Dianne Magalhães Viana

Brasília

2023

B186a Baliza Rocha, Gabriel.
Análise de aspectos de construção, atrito e comunicação de robô ápole bioinspirado / Gabriel Baliza Rocha; orientadora Carla Maria Chagas e Cavalcante Koike; coorientadora Dianne Magalhães Viana. -- Brasília, 2023.
68 p.

Projeto Final de Curso (Engenharia de Controle e Automação)
-- Universidade de Brasília, 2023.

1. Robótica modular. 2. Bio-inspirado. 3. Atrito anisotrópico.
4. Cobra robô. I. Chagas e Cavalcante Koike, Carla Maria, orient.
II. Magalhães Viana, Dianne, coorient. III. Título

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**Análise de aspectos de construção, atrito e
comunicação de robô ápole bioinspirado**

Gabriel Baliza Rocha

Projeto Final de Curso submetido como requi-
sito parcial para obtenção do grau de Enge-
nheiro de Controle e Automação

Trabalho aprovado. Brasília, 25 de Julho de 2023:

**Profa. Dra. Carla Maria Chagas e
Cavalcante Koike, UnB/IE/CIC**
Orientadora

**Prof. Dr. Marcus Vinicius Lamar,
UnB/IE/CIC**
Membro da Banca

**Prof. Dr. Jones Yudi Mori Alves da Silva,
UnB/FT/ENM**
Membro da Banca

**Profa. Dra. Dianne Magalhães Viana,
UnB/FT/ENM**
Coorientadora

Brasília
2023

Agradecimentos

Agradeço à minha família, meu pai Josué, minha mãe Sueli e minha irmã Maria Eduarda, que sempre me apoiaram no curso e na vida, e fizeram seu melhor para que eu pudesse chegar aonde cheguei.

Agradeço à minha orientadora, Professora Carla, e à minha coorientadora, Professora Dianne, me guiaram no desenvolvimento desse trabalho. Aprendi com elas que o mundo da ciência não é feito só de acertos.

Agradeço também a todos os membros, atuais e antigos, da equipe de robótica UnBall, da qual fiz parte durante a maior parte do curso e tive o privilégio de ser capitão. A equipe me permitiu ter experiências que não seriam possíveis fora dela: representar a UnB em competições nacionais e internacionais, conhecer outras universidades pelo Brasil, conhecer pessoas novas, além de desenvolver um projeto real e complexo. Os momentos que vivi foram indispensáveis para o meu amadurecimento.

Por fim, agradeço aos amigos que fiz ao longo da minha graduação, em especial à Ayssa Marques, que me apoia em tudo que faço. Suas revisões foram muito importantes para a entrega desta etapa final de conclusão de curso. Obrigado por estar ao meu lado nos momentos difíceis dessa jornada.

Resumo

Uma forma de desenvolver novos produtos e avanços científicos é buscar inspiração na natureza. O ato de observar animais, plantas e outros seres vivos para buscar inspiração e solucionar problemas é chamado biomimética. Entre os vários produtos que já foram desenvolvidos com essa técnica estão robôs cobra. Serpentes são animais fascinantes que apesar de não possuírem membros conseguem se locomover de maneira eficiente, em diversos tipos de terreno. Essa capacidade de locomoção é muito útil em situações na qual pessoas, ou robôs que utilizem rodas, não seriam capazes de entrar, como missões espaciais, locais com escombros após desastres e inspeção de tubos, por exemplo. Um fator importante para permitir a movimentação desses robôs é a necessidade de um atrito anisotrópico, alcançado por cobras pelas suas escamas, cuja função é de difícil replicação em robôs. Unindo tudo isso à robótica modular é possível criar robôs longos, eficientes, e adaptados à necessidade do ambiente. O objetivo deste trabalho consiste em propor soluções para o desenvolvimento de um protótipo de robô modular bio-inspirado em serpentes, a partir da análise dos aspectos de atrito, de construção do módulo e de protocolos de comunicação. Para avaliar o atrito foram realizados testes de escorregamento, com a contagem de *frames* para avaliar a passagem de tempo e a partir do tempo de escorregamento foram calculados os coeficientes de atrito de diferentes elementos, chamados "placas de atrito" em diferentes direções. Foi observado que uma placa rígida não é suficiente para obter a anisotropia desejada, então é proposta uma solução baseada na literatura. A estrutura física do robô foi analisada e foram propostas alterações, essas feitas em CAD para posterior fabricação. Por fim, a comunicação entre módulos foi desenvolvida baseada em um protocolo já existente, o I2C, e testada utilizando equipamentos de bancada, como fontes de tensão/corrente e *protoboard*.

Palavras-chave: Robótica modular. Bio-inspirado. Atrito anisotrópico. Cobra robô.

Abstract

One way to develop new products and scientific advances is to seek inspiration from nature. The act of looking at animals, plants, and other living things to seek inspiration and solve problems is called biomimicry. Among the many products that have already been developed using this technique are snake robots. Snakes are fascinating animals that, despite not having limbs, manage to move efficiently in different types of terrain. Its locomotion capability is very useful in situations where people, or robots that use wheels, would not be able to enter, such as space missions, places with rubble after disasters, and pipe inspection, for example. An important factor to allow these robots to move is the need for anisotropic friction, achieved by snakes through their scales, whose function is difficult to replicate in robots. Combining all this with modular robotics, it is possible to create long, efficient robots adapted to its needs and to the environment. The objective of this work is to propose solutions for the development of a prototype of a modular robot bio-inspired by snakes, based on the analysis of friction aspects, module construction and communication protocols. To evaluate the friction, slip tests were performed, with the measurement of each frame to evaluate the passage of time and calculate the movement time, the coefficients of friction of different elements, called "friction plates", in different directions. It was observed that a rigid plate is not enough to obtain the desired anisotropy, so a solution based on the literature is proposed. The physical structure of the robot was analyzed and changes were proposed, these are made in CAD for later manufacture. Finally, the communication between modules was developed based on an existing protocol, the I2C, and tested using lab equipments, such as current and voltage sources and protoboards.

Keywords: Modular robotics. bioinspired. Anisotropic friction. Snake robot.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Projeto de asa bio-inspirado e fonte de inspiração	16
Figura 2.2 – Comparativo entre bico do pássaro e do trem-bala <i>Shinkansen</i>	17
Figura 2.3 – Esqueleto típico de serpente	18
Figura 2.4 – Jararaca. É possível visualizar as organização das escamas ao longo do corpo do animal	19
Figura 2.5 – Movimentação de cobras	20
Figura 2.6 – Conjunto de módulos do robô modular Smart Pebble, formado por pequenos cubos.	22
Figura 2.7 – Módulos conectados formando um robô - CAD	23
Figura 2.8 – Ilustração explicativa dos movimentos <i>pitch, yaw e roll</i>	23
Figura 2.9 – Curva serpenoide contínua	24
Figura 2.10–Influencia dos parâmetros a , b e c na curva	25
Figura 2.11–Curva serpenoide discreta	25
Figura 2.12–Conexão de dois módulos	26
Figura 2.13–Representação da medida de ângulo entre módulos	26
Figura 2.14–Robô ACM-III	27
Figura 2.15–Robô Wheeko	28
Figura 2.16–Robô ACM-R4	28
Figura 2.17–Robô modular OT4	29
Figura 2.18–Robô modular heterogêneo	29
Figura 2.19–Robô modular <i>Unified</i>	29
Figura 2.20–Robô ErekoBot Beta 5 com quatro módulos	30
Figura 2.21–Robô ErekoBot Alpha	31
Figura 2.22–Módulo Sigma (projeto CAD) e Módulo Sigma-Lily montado	31
Figura 2.23–Robô e módulo da série VDM	32
Figura 3.24–Geometrias do modelo VDM	33
Figura 3.25–Geometrias do modelo VDM	34
Figura 3.26–Placa de atrito inicial	35
Figura 3.27–Tampa do módulo	35
Figura 3.28–Placa de atrito inicial	35
Figura 3.29–Vista superior da placa de atrito, mudanças para fixação	36
Figura 3.30–Detalhe da região onde se posiciona o motor no módulo	36
Figura 3.31–Detalhe da região onde se posiciona o motor no módulo	37
Figura 3.32–Detalhe das entrâncias para a tampa no corpo	37
Figura 3.33–Tampa final com rabo de andorinha	37
Figura 3.34–Modulo fabricado	38

Figura 4.35–Plano inclinado	40
Figura 4.36–Plataforma para testes de atrito	42
Figura 4.37–Corpo de teste de 140g	43
Figura 4.38–Placas 1 e 2 em <i>software</i> CAD. Aqui é possível visualizar o arredondamento dos elementos centrais da placa.	43
Figura 4.39–Placas 1 e 2 fabricadas em PLA preto. A direção dos testes de escorregamento foi feita conforme a figura	44
Figura 4.40–Placa 3 fabricada em PLA preto e com indicação de direções.	44
Figura 4.41–Placas 4 e 5 fabricadas em PLA preto. A direção dos testes de escorregamento foi feita conforme a figura. Os círculos em branco são feitos de EVA utilizando um furador de papel de 5mm	45
Figura 4.42–Placas 6 e 7 fabricadas em PLA preto. A direção dos testes de escorregamento foi feita conforme a figura. Os círculos de EVA+fitas crepe foram feitos colando a fita por cima do EVA e cortando com um furador de papel de 5mm.	46
Figura 4.43–Placa 8 fabricada em PLA verde-água e com indicação de direções. A cor não interferiu nos testes, sendo a mudança feita por disponibilidade. Na figura os círculos de EVA estão marcados com um ponto vermelho em seu centro.	46
Figura 4.44–Placa 9 fabricada em PLA verde-água e com indicação de direções.	47
Figura 4.45–Início e fim dos testes de escorregamento	48
Figura 4.46–Elementos para placa de atrito.	50
Figura 4.47–Tabela de coeficientes de atrito para as direções dianteira, traseira e lateral, respectivamente.	50
Figura 5.48–Conexão serial de 3 dispositivos. A conexão pode ser expandida infinitamente (atendendo limitações do barramento e de transmissão), mas para cada dispositivo escravo adicional é necessário aumentar a quantidade de saídas de seleção (<i>select</i> , em verde), além da conexão das outras entradas: R/W, SCL e SDA, o que aumenta rapidamente a complexidade do sistema.	53
Figura 5.49–Exemplo de conexão de dispositivos I ² C ao barramento	55
Figura 5.50–Transferência de dados no barramento	55
Figura 5.51–Formato das mensagens enviadas. S: Condição inicial, L/E: Leitura/Escreita, A: ACK, P: Parada ou Início	56
Figura 5.52–Arduino Pro Mini	59
Figura 5.53–Servo Motor MG995	59
Figura 5.54–Montagem do circuito. A legenda de cores segue: vermelho - VCC, marrom - GND, amarelo - SDA, azul - SLK, laranja - comando. O primeiro Arduino (esquerda) é quem envia o comando. Para a direita é possível expandir o número de módulos repetindo as conexões de Arduino, motor e I2C.	60

Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Tempos de escorregamento	48
Tabela 4.2 – Resultados iniciais do teste de escorregamento	49
Tabela 4.3 – Coeficientes de atrito	49
Tabela 5.4 – Definição de terminologia	54

Lista de abreviaturas e siglas

A/D	Analógico para digital	56
CAD	Projeto auxiliado por computador (do inglês <i>Computer-aided design</i>	14
CI	Circuito Integrado	56
D/A	Digital para analógico	56
DOF	Graus de Liberdade (do inglês <i>Degree of Freedom</i>)	28
EVA	Etileno Acetato de Vinila	45
fps	<i>Frames</i> por segundo	47
I ² C	Circuito Inter-Integrado <i>Inter-Integrated Circuit</i>	15
I/O	Entrada e Saída (do inglês <i>Input and Output</i>)	56
MDF	Fibras de Média Densidade (do inglês <i>Medium Density Fiberboard</i>)	42
PCI	Placa de circuito impresso	56
PLA	Poliácido láctico (termoplástico)	14
TPU	Termoplástico de Poliuretano	51
VDM	Valdemar (abrasileiramento de <i>Voldemort</i>)	30

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Objetivos	14
1.2	Metodologia	14
1.3	Estrutura do trabalho	15
2	Biomimética	16
2.1	Anatomia e movimentação de cobras biológica	17
2.1.1	Anatomia de cobras biológicas	17
2.1.2	Movimentação de cobras biológicas	19
2.2	Movimentação do robô	21
2.2.1	Robótica modular	21
2.2.2	Anatomia de cobras robóticas	22
2.2.3	Curva de Hirose	23
2.2.4	Discretização da curva	24
2.2.5	Ângulo entre módulos e construção do módulo	25
2.3	Projetos e protótipos de robôs cobra	27
2.4	Série EREKO	30
3	Prototipagem do módulo	33
3.1	Modelo VDM	33
3.2	Alterações propostas	34
4	Atrito	39
4.1	Visão geral	39
4.2	Análise do atrito dinâmico em plano inclinado	40
4.3	Testes de escorregamento	41
4.4	Descrição das placas de atrito	42
4.4.1	Placa 0	42
4.4.2	Placas 1 e 2	43
4.4.3	Placa 3	44
4.4.4	Placas 4 e 5	45
4.4.5	Placas 6 e 7	45
4.4.6	Placa 8	46
4.4.7	Placa 9	47
4.5	Resultados	47
4.6	Trabalhos futuros	50

5	Comunicação entre módulos	52
5.1	Breve descrição histórica	52
5.2	O protocolo	54
5.3	Código da cabeça	56
5.4	Código da vértebra	57
5.5	Camada física	59
6	Conclusões	61
6.1	Trabalhos futuros	62
	REFERÊNCIAS	63
	Apêndices	66
	Apêndice A Códigos de programação	67
A.1	Código da cabeça do robô (controlador)	67
A.2	Código da vértebra do robô (receptores)	68

1 Introdução

A natureza serve de inspiração para os seres humanos desde o início da civilização. Desde materiais têxteis como o Velcro (VELCRO..., 2023), até o *Shinkansen*, trem-bala (WEST, 2023) foram criados ou aperfeiçoados a partir da análise de animais, plantas ou outros elementos comumente encontrados na natureza. Dentre eles, serpentes, popularmente chamadas genericamente de cobras, servem de inspiração na estrutura e movimentação de robôs desde os anos 1970.

O primeiro robô bio-inspirado em cobra a seguir a movimentação similar a de cobras reais, chamada curva serpenóide, foi desenvolvido em 1972 pelo pesquisador japonês Shigeo Hirose (HIROSE; YAMADA, 2009). Após este, muitas outras pesquisas envolvendo robôs cobra modulares foram desenvolvidos em universidades ao redor do mundo, como na Norwegian University of Science and Technology (Noruega) (LILJEBÄCK, 2011), Jiangsu Province Universities Natural Science (China) (QIAO et al., 2017), Universidad Autonoma de Madrid (Espanha) (GONZALEZ-GOMEZ et al., 2010) (GÓMEZ, 2008), The University of Michigan (Estados Unidos) (BORENSTEIN; HANSEN; BORRELL, 2006) e Universidade de Brasília (Brasil) (SOUZA; DUTRA et al., 2010) (GALEMBECK, 2018). O grande número de trabalhos apresentados mostram a relevância da pesquisa.

A principal vantagem de robôs cobras vem da contraparte biológica: seu formato. Pela anatomia longa e fina serpentes conseguem entrar em locais estreitos, subir árvores (SOCHA, 2002) e até nadar. Um robô com essas características é ideal para operações de resgate em locais de difícil acesso (GONZALEZ-GOMEZ et al., 2010) (BORENSTEIN; HANSEN; BORRELL, 2006), ou inspeção de tubulações (BRUNETE et al., 2012).

Um elemento indispensável para possibilitar a movimentação de cobras, tanto biológicas quanto robóticas, é a anisotropia no atrito, no contato entre a base do corpo e do chão. Serpentes possuem escamas especializadas para cada parte de seu corpo e controle sobre sua musculatura para alcançar essa característica (MARVI et al., 2015), (BAUM et al., 2014), porém isso não é simples de se reproduzir de forma mecânica.

A dificuldade de reprodução dessas características faz com que muitas vezes esta seja ignorada no projeto de robôs bio-inspirados em cobras. Outra solução encontrada por pesquisadores é a utilização de rodas ou esteiras, podendo ser passivas ou ativas. Neste trabalho busca-se uma solução que seja facilmente expansível e em um primeiro momento rígida e estática (sem movimento), e que possa ser facilmente fixada à base de cada módulo do robô.

Outro ponto de interesse do trabalho é a transmissão da informação e do movimento entre os módulos, de forma a possibilitar a movimentação do robô, seguindo uma curva

serpenóide (HIROSE; TONY, 1994). Hirose descreveu matematicamente a curva de movimentação das cobras, o que foi posteriormente discretizado por Qiao (QIAO et al., 2017) pensando em modelos modulares.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste em propor soluções envolvendo o atrito, os aspectos construtivos do módulo e protocolos de comunicação para o desenvolvimento de um protótipo de robô modular bio-inspirado em serpentes (ápode), de tal forma que o robô consiga se locomover utilizando equações do movimento baseadas em serpentes reais, apresentadas por (GÓMEZ, 2008) e discretizadas por (QIAO et al., 2017). Para isso é necessário:

- Desenvolver o protótipo de um módulo para o robô cobra a partir da proposta de Galembeck (GALEMBECK, 2018);
- Realizar testes experimentais com diferentes materiais para avaliar a introdução da anisotropia em cada módulo;
- Implementar a comunicação entre módulos de tal forma a garantir que cada motor realize seu movimento no tempo certo, de maneira sincronizada.

1.2 Metodologia

O trabalho foi dividido em duas etapas, sendo a primeira teórica, com pesquisas bibliográficas sobre: movimentação de cobras e serpentes biológicas, atrito anisotrópico, movimentação de robôs ápodes, robôs modulares, desenvolvimentos anteriores de robôs cobra e protocolos de comunicação. Para as pesquisas foram utilizadas variações dos termos mencionados, tanto em português quando em inglês.

A segunda etapa foi dividida em três partes. Na primeira, foi analisado, adaptado e fabricado o módulo proposto por (GALEMBECK, 2018), o qual apenas propõe uma geometria básica.

A segunda parte envolve a realização de testes de escorregamento das placas de atrito previstas por (GALEMBECK, 2018) para avaliar o atrito nas direções frontais e laterais. Todas as placas, e o módulo, foram projetados em *software* CAD 3D e fabricados utilizando o polímero PLA e em processo de fabricação aditiva. Ao final dos testes os resultados foram analisados e proposta uma solução com base na literatura.

Por fim, na terceira parte, é implementada e analisada a comunicação entre módulos.

1.3 Estrutura do trabalho

No [Capítulo 2](#) é feita uma apresentação geral do que é a biomimética e de suas evidências no dia-a-dia. Também é feito um estudo sobre a anatomia e movimentação de cobras biológicas e as aplicações para converter esses aspectos em anatomia e movimentação de cobras robóticas. Ao final do capítulo são apresentados diferentes robôs cobras, tanto dentro da UnB com o grupo EREKO, quanto em outras universidades e grupos de pesquisa ao redor do mundo.

No [Capítulo 3](#) é apresentada uma proposição para a construção física de módulo, com a respectiva fabricação do protótipo.

No [Capítulo 4](#) é apresentado um estudo teórico sobre atrito, bem como os resultados experimentais dos testes de anisotropia realizados com placas a serem fixadas na base do robô.

No [Capítulo 5](#) são apresentados um estudo teórico sobre o protocolo de comunicação I²C e a aplicação desse protocolo no robô desenvolvido, incluindo descrições da programação dos microcontroladores envolvidos e das ligações necessárias em *hardware*.

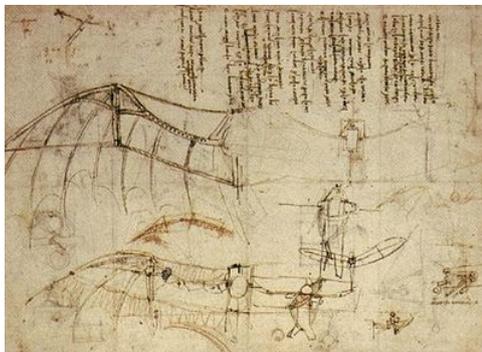
2 Biomimética

A biomimética permite que cientistas, pesquisadores e inventores se inspirem na natureza, imitando suas soluções para problemas em diversas áreas (BENYUS, 1997). A análise da anatomia de animais em nível micro e macroscópico permite a criação de produtos, processos e sistemas mais eficientes e mais sustentáveis, além de possibilitar o entendimento do mundo e do ser humano.

O termo foi popularizado no final da década de 1990 pela bióloga e escritora Janine Benyus, com o livro *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, (Biomimética: Inovação Inspirada pela Natureza) (BENYUS, 1997). Também é co-fundadora do Biomimicry Institute, em 2006, organização sem fins lucrativos que busca integrar a biologia ao processo de design.

A ideia de se inspirar na natureza não é nova. Em especial, a capacidade de voar de alguns animais sempre prendeu a atenção humana. Por volta de 1490, Leonardo da Vinci (1452 - 1519) já estudava a natureza em busca de inspiração para suas criações. Um deles foi um projeto de “máquina voadora”, Figura 2.1, que não chegou a ser construída, mas o projeto foi feito após estudos minuciosos da asa de morcegos.

Figura 2.1 – Projeto de asa bio-inspirado e fonte de inspiração



(a) Projeto de asas bio-inspiradas criado por da Vinci

Fonte: (VINCI, 1490)



(b) Asa de morcego

Fonte: (REDMAN, 2021)

Existem invenções bio-inspiradas aparentemente simples, mas que demandaram anos de estudo e análise, como o *velcro* (VELCRO..., 2023), criado pelo engenheiro eletricitista suíço George de Mestral em 1952 após mais de uma década de estudo. A inspiração surgiu após o engenheiro passear com seu cachorro na mata e perceber o quão bem as plantas do gênero *Xanthium*, muito comuns na região, se grudavam ao pelo do animal e às suas roupas.

Também existem projetos bio-inspirados que demandam alta tecnologia, como o trem-bala japonês *Shinkansen*. Em 1989 o trem já alcançava velocidades próximas a 270km/h , mas era muito barulhento, especialmente ao sair de túneis, o que causava muito desconforto para

a população. A solução surgiu a partir da observação à natureza. O pantógrafo, dispositivo montado no topo do trem para alimentá-lo com energia elétrica, foi inspirado nas asas de corujas, a pelugem de pinguins inspirou o suporte para os pantógrafos, e o bico de guarda-rios inspirou o formato do bico do *Shinkansen*, visto na [Figura 2.2](#). Lançado em 1997, solucionou não só o problema do barulho como também aumentou a eficiência do meio de transporte. (WEST, 2023).

Figura 2.2 – Comparativo entre bico do pássaro e do trem-bala *Shinkansen*

(a) Dois *Shinkansen* lado a lado



Fonte: Yecombe, sob licença *Creative Commons* Não Comercial

(b) Pássaro Guarda-rios



Fonte: Shahin Olakara, sob licença *Creative Commons*

Esses exemplos mostram o quanto a biomimética pode ajudar na solução de problemas de diversos tipos. A robótica não é exceção. Robôs inspirados em animais, sendo quadrúpedes ou bípedes, ganham força com o passar dos anos, pois alcançam lugares onde dispositivos com rodas não conseguem. Neste trabalho estudou-se a movimentação e estrutura de robôs ápole, que não possuem pernas ou rodas ativas e se assemelham a cobras, tanto no seu formato quanto na sua locomoção.

2.1 Anatomia e movimentação de cobras biológica

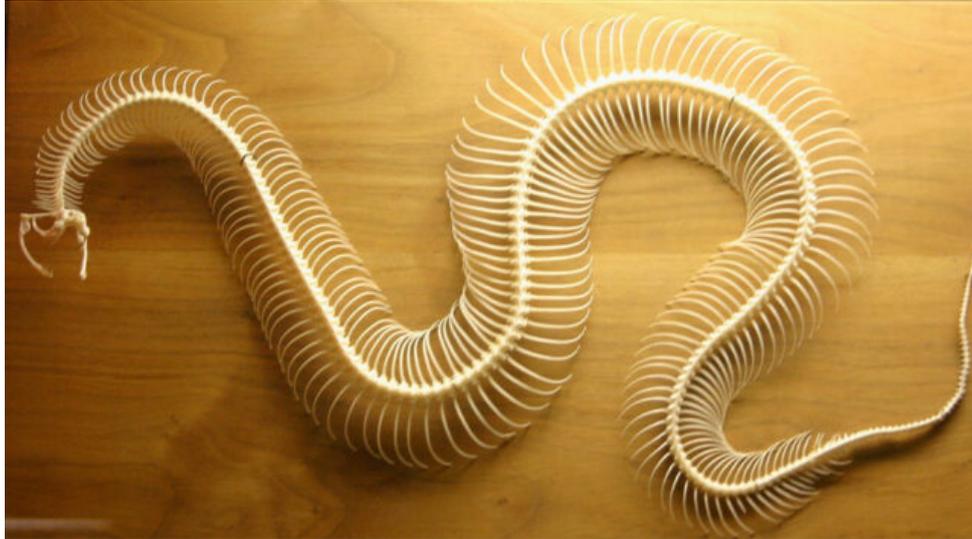
Antes de se iniciar a criação de uma modelagem para um robô inspirado em serpentes, é necessário entender como esses animais funcionam e se locomovem. Diferentemente de sistemas robóticos e mecânicos que são projetados, planejados e construídos por pessoas, a evolução dos seres vivos não segue um planejamento. Durante milhões de anos, animais com pernas, conforme comprovado por vestígios fósseis e características anatômicas em serpentes modernas (ROSCITO et al., 2018), perderam seus membros. No entanto, eles mantiveram a mobilidade e a versatilidade em seus movimentos, servindo como inspiração para esse trabalho.

2.1.1 Anatomia de cobras biológicas

O esqueleto de uma serpente pode ser dividido em três partes distintas: crânio, coluna vertebral e costelas. O crânio sustenta a cabeça da cobra e é onde está o cérebro e a

mandíbula. A coluna vertebral é composta por um conjunto de vértebras (entre 100 e 400) que funcionam como juntas, que são acoplamentos mecânicos entre dois objetos. Ligadas as vértebras, estão as costelas, que dão sustentação a coluna e proteção aos órgãos internos da cobra. (LILJEBÄCK, 2011) Um esqueleto típico de cobra pode ser visto na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Esqueleto típico de serpente



Fonte: <https://www.nsctotal.com.br/noticias/esqueleto-de-cobra> - Acessado em 30/04/2023

Por dentro das vértebras passa a coluna espinal, responsável por transportar sinais elétricos do cérebro para o resto do corpo. Por ser um órgão delicado, o formato das vértebras impõe limitações na faixa possível de movimentação entre elas. Essas limitações garantem a segurança da coluna e conseqüentemente do animal. As vértebras podem ser modeladas como um conjunto de juntas esféricas com limitadores. O grande número de vértebras compensa essa limitação, permitindo uma grande variedade de movimentos.

Outro ponto importante a se considerar na movimentação de cobras é sua pele, que é coberta por escamas, como pode ser visto na Figura 2.4. Além de dar proteção ao animal sem dificultar sua locomoção, as escamas possuem atrito anisotrópico, fator que não é só intrínseco ao formato das escamas, mas também é controlado pelo animal (MARVI et al., 2015), o que aumenta suas capacidades de movimento.

Figura 2.4 – Jararaca. É possível visualizar as organização das escamas ao longo do corpo do animal



Fonte: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/ultima-hora/ciencia/nova-especie-de-serpente-jararaca-e-descoberta-na-caatinga-entenda-as-diferencas-1.3184347>

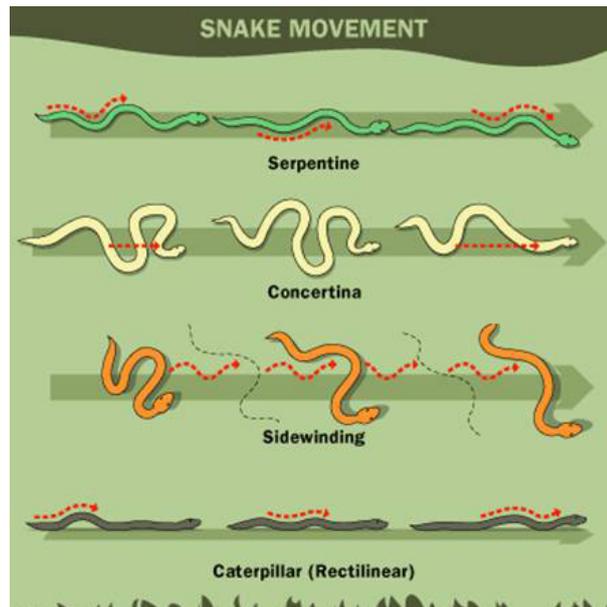
2.1.2 Movimentação de cobras biológicas

O movimento é realizado pela contração e relaxamento de músculos ao longo do corpo do animal, disposto em cada um dos lados (direito e esquerdo), de forma diagonal, ligados a costelas que podem estar próximas entre si ou mais distantes ao longo do corpo. A combinação de quais músculos estão contraídos ou relaxados permite a realização de diversos tipos de movimento, como se dobrar, curvar, levantar parte do corpo, ou até diminuir e aumentar seu comprimento.

A locomoção das serpentes varia dependendo do habitat em que as diferentes espécies residem. Animais como a *Eunectes murinus* (Sucuri-verde) apresentam hábitos semiaquáticos, vivendo em regiões alagadas e podem até nadar. Em contraste, *Chrysopelea paradisi* (cobra voadora) é uma espécie que vive no topo de árvores e consegue pular de grandes alturas (cerca de 10 metros) e planar por longas distância (10 metros de distância horizontal) (SOCHA, 2002).

Na elaboração deste projeto voltado para aplicações em robótica, é imprescindível investigar, inicialmente, como esses animais se deslocam no terreno. Existem quatro tipos básicos de movimentos, que variam de acordo com a necessidade do animal, espécie e habitat. São eles: serpentina, concertina, movimentação retilínea e *sidewinging*. Uma ilustração mostrando cada uma das quatro movimentações pode ser visto na Figura 2.5. (LILJEBÄCK, 2011)

Figura 2.5 – Movimentação de cobras



Fonte: <https://www.forpetessnakes.ca/2021/04/29/how-do-snakes-move/>

- **Serpentina**, ou ondulação lateral, é a forma mais rápida e comum de movimentação por cobras. Ondas de movimentação são propagadas ao longo do corpo do animal, e a medida que se propagam, no sentido da cabeça à calda, seu corpo se empurra contra irregularidades no solo. Esse mesmo padrão de movimento é repetido para o nado, sendo o corpo empurrado pela resistência da água. Por depender de irregularidades no solo, esta movimentação não é possível em ambientes escorregadios.
- **Concertina** é utilizado principalmente em ambientes apertados, com uma grande limitação da capacidade de movimento (impedindo que a serpentina seja realizada). Para essa estratégia ocorrer é necessário primeiro estender as regiões frontais do corpo, enquanto as regiões traseiras estão curvadas, funcionando como uma âncora no ambiente estreito. Quando as regiões frontais estão totalmente estendidas, estas se curvam, invertendo ancoragem e permitindo que o resto do corpo vá para frente.
- Na **movimentação retilínea** as cobras utilizam da sua capacidade de aumentar e diminuir seu comprimento, mesmo que de forma limitada. Ao contrair e relaxar os músculos, parte do corpo se estende, e, utilizando as escamas como ancoragem, o restante do corpo é puxado para frente. Essa movimentação dos músculos acontece por todo o corpo de forma alternada, parte estando estendida e parte estando relaxada.
- A movimentação chamada **sidewinging** utiliza o corpo da serpente como ancoragem, de forma similar a concertina. Essa movimentação é mais utilizada em ambientes arenosos. Nela a cobra utiliza parte do corpo como ancoragem, levanta a cabeça do

chão e joga para a lateral, voltando ao chão. De forma similar a movimentação se repete para o restante do corpo.

É possível notar a importância dos pontos de ancoragem para a movimentação das serpentes. Esses pontos surgem principalmente das escamas, que apresentam atrito anisotrópico, sendo pequeno na direção cranial (para frente no movimento), intermediário em direções laterais e maior na direção caudal (contrário ao movimento). Isso ocorre pela geometria das escamas, além dos diferentes tipos em cada parte do corpo da serpente (BAUM *et al.*, 2014). As escamas são órgãos vivos, fazendo parte da pele desses animais, controlados ativamente pelas cobras, tornando-as ainda mais surpreendentes.

2.2 Movimentação do robô

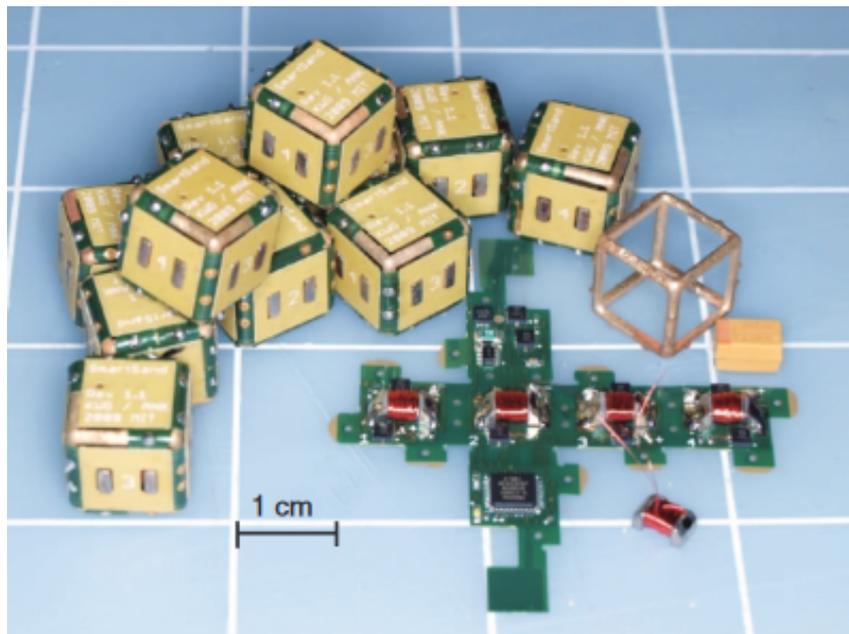
2.2.1 Robótica modular

O robô aqui proposto não é apenas bio-inspirado em cobras, ele também é **modular**. Robôs modulares são compostos por unidades mínimas padronizadas, contendo sensores e atuadores, e podendo ser ligadas de diferentes maneiras. A seguir são apresentados conceitos importantes acerca de robótica modular, importantes para a realização deste trabalho, com base em Benhabib *et al.* (BENHABIB; DAI, 1991).

- **Módulo:** menor unidade de um robô modular. Cada módulo deve ser independente, possibilitar conexão com outros módulos, e ser projetado para ter o menor peso e inércia. Para a aplicação aqui proposta os módulos são como as vértebras da cobra;
- **Juntas:** elementos responsáveis pela conexão e movimentação dos módulos entre si, e individualmente. Para a aplicação aqui proposta as juntas são como os músculos e ligamentos entre as vértebras;
- **Robô:** um conjunto de módulos ligados entre si e que trabalham/se movimentam em harmonia. Para a aplicação aqui proposta o robô é como a cobra como um todo;
- **Homogêneo:** um robô é dito homogêneo quando todos os seus módulos são do mesmo tipo;
- **Heterogêneo:** um robô é dito heterogêneo quando seus módulos são de tipos diferentes. (BRUNETE *et al.*, 2012) apresenta um robô cobra heterogêneo, com diferentes formatos, atuadores e sensores em cada módulo, mas mudanças simples, como apenas o tipo de sensor em cada um é suficiente para o robô se tornar heterogêneo;
- **Reconfigurável:** um robô modular é dito reconfigurável quando é possível alterar a ligação entre seus módulos, com ou sem a interferência humana.

Robôs cobra são um exemplo clássico de robótica modular, com sua estrutura formada por pequenos elementos repetidos formando um robô longo, entretanto não são o único. Benhabib *et al.* desenvolveu um robô modular tipo SCARA voltado para aplicações industriais. Outro exemplo é o robô desenvolvido por Gilpin *et al.*, (GILPIN; RUS, 2010), cujo robô modular é reconfigurável e autônomo, e formado por cubos de 12mm de lado, [Figura 2.6](#). Cada módulo se move de forma independente, e em conjunto podem se configurar em diferentes formatos para solução de diferentes problemas.

Figura 2.6 – Conjunto de módulos do robô modular Smart Pebble, formado por pequenos cubos.



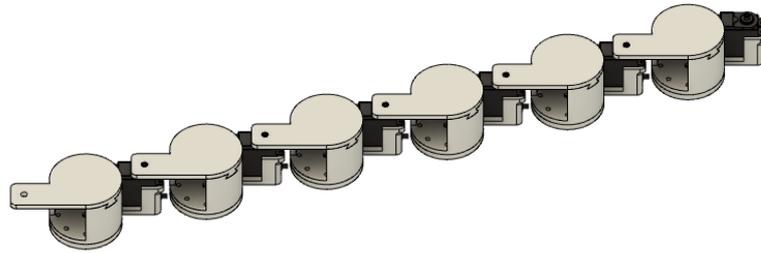
Fonte: (GILPIN; RUS, 2010)

As diversas aplicações e possibilidades mostram a importância da robótica modular e como esta ainda pode ganhar força para desenvolvimentos futuros.

2.2.2 Anatomia de cobras robóticas

Robôs inspirados em cobras podem ser modulares ou não, com atuações diversas, desde motores, rodas ou até atuação pneumática. Esse trabalho foca no desenvolvimento de um robô modular. De maneira geral, a cobra (neste caso, o robô cobra) pode ser simplificada a um conjunto de módulos, que representam as vértebras do robô. Um módulo pode ser definido como uma unidade que seja independente, projetada para peso e inércia mínimos, e conectada a outros módulos, o que pode ser visto na [Figura 2.7](#). A conexão entre os módulos é feita junta ao eixo do motor (atuação).

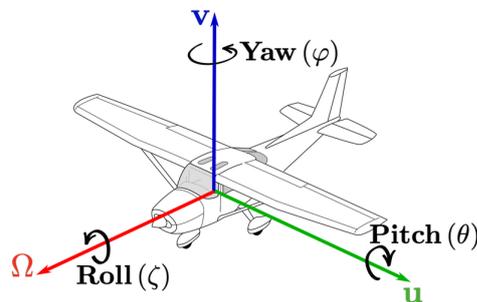
Figura 2.7 – Módulos conectados formando um robô - CAD



Fonte: Imagem do autor

A atuação pode ser dividida em três tipos: *pitch*, *yaw* e *roll*, termos oriundos da aviação. Essas movimentações são relativas à posição do módulo. Aqui considera-se *yaw* a atuação normal ao solo, *roll* a que ocorre na direção do movimento e *pitch*, a que é perpendicular ao movimento, como pode ser visto na Figura 2.8. A combinação de atuações entre módulos permite total liberdade na movimentação do robô.

Figura 2.8 – Ilustração explicativa dos movimentos *pitch*, *yaw* e *roll*



Fonte: (DEGOND; DIEZ; NA, 2021)

Ao discretizar matematicamente a curva realizada por cobras com movimentação em serpentina, tem-se que todos os movimentos são do tipo *Yaw-Yaw*, pois a cobra não levanta seu corpo do solo, nem rotaciona seu corpo na direção do movimento (*Roll*). Esse será o tipo de movimentação que será estudada neste trabalho.

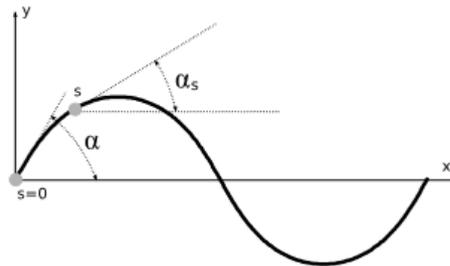
2.2.3 Curva de Hirose

Serpentina é a forma de locomoção mais comum realizada por cobras biológicas. Nela cada parte do corpo da cobra segue um caminho similar. Hirose (HIROSE; TONY, 1994) descreve a curva da serpentina como um serpenóide (ou serpentóide) contínua, com expressão dada pela Equação 2.1.

$$\begin{cases} x(s) = \int_0^s \cos(a \cdot \cos(bs) + cs) ds \\ y(s) = \int_0^s \sin(a \cdot \cos(bs) + cs) ds \end{cases} \quad (2.1)$$

onde s é um segmento infinitesimal ao longo do corpo do animal/robô, a é o ângulo de abertura inicial do movimento, b é o número de períodos no comprimento dado e c é a direção do movimento. A curva serpenóide pode ser vista na [Figura 2.9](#).

Figura 2.9 – Curva serpenoide contínua



Fonte: (GÓMEZ, 2008)

As equações descritas fornecem a curva ideal para a realização do movimento serpenina, que depende de módulos infinitesimais, criando uma estrutura contínua. Esse tipo de robô é impossível de ser construído. No caso real os robôs são discretos, tendo um número N limitado de módulos, por isso é necessário ajustes à curva.

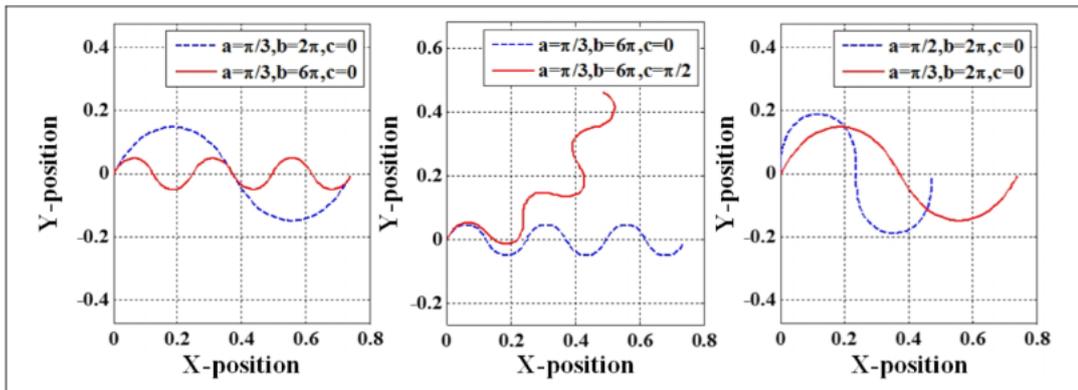
2.2.4 Discretização da curva

(QIAO et al., 2017) apresenta uma versão discretizada da curva serpenóide. Essa versão discretizada é apresentada na [Equação 2.2](#). Nela N é o número de módulos. Na equação discretizada, os parâmetros a , b e c determinam o formato da curva a ser realizado, assim a controla a amplitude da curva, b controla o número de períodos da curva ao longo do corpo do robô e c adiciona um deslocamento rotacional a curva. Na [Equação 2.2](#) são dadas as coordenadas de cada i -ésimo módulo ao longo da curva.

$$\begin{cases} x_i = \frac{1}{N} \cos \left(a \cdot \cos \left(\frac{Kb}{N} \right) + \frac{Kc}{N} \right) \\ y_i = \frac{1}{N} \sin \left(a \cdot \cos \left(\frac{Kb}{N} \right) + \frac{Kc}{N} \right) \end{cases} \quad (2.2)$$

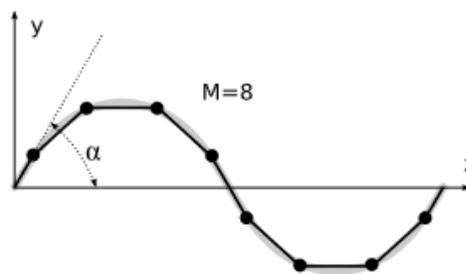
Na [Figura 2.10](#) é possível visualizar a influência dos parâmetros a , b e c na curva e na [Figura 2.11](#) é possível observar uma curva discretizada com oito módulos.

Figura 2.10 – Influencia dos parâmetros a , b e c na curva



Fonte: (QIAO et al., 2017)

Figura 2.11 – Curva serpenoide discreta



Fonte: (GÓMEZ, 2008)

2.2.5 Ângulo entre módulos e construção do módulo

Um ponto muito importante para o projeto do robô, tanto físico quanto no controle de sua movimentação é o ângulo entre módulos. Cada módulo projetado tem apenas 1 grau de liberdade, que é limitado pelo motor escolhido, um servo motor MG995, a uma rotação de aproximadamente 180° graus. Na [Figura 2.12](#) é possível visualizar dois módulos conectados, em três posições importantes: central, angulação mínima e angulação máxima.

Figura 2.12 – Conexão de dois módulos

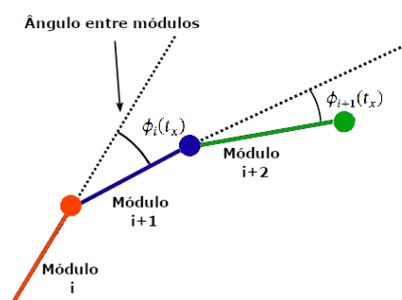


Fonte: Figura do autor

Gómez (GÓMEZ, 2008) apresenta uma equação para a obtenção de cada ângulo do robô em relação ao tempo, e Carvalho (GOMES, 2023) ajusta esta equações aos parâmetros específicos ao módulo desenvolvido neste trabalho. A equação para obtenção do ângulo que cada módulo faz em relação eixo do próprio módulo é apresentada na Equação 2.3. Nela surge um termo adicional, ω , que diz respeito a velocidade que a serpenóide se propaga ao longo do corpo do robô.

$$\phi_i(t) = -2 \cdot a \cdot \text{sen} \left(\frac{b}{2N} \right) \text{sen} \left(\omega t + \frac{i \cdot b}{N} \right) - \frac{c}{N} \quad (2.3)$$

Figura 2.13 – Representação da medida de ângulo entre módulos



Fonte: Adaptado de (GÓMEZ, 2008)

Na Figura 2.13 são apresentados dois ângulo de forma simplificada, seguindo o formato do módulo aqui trabalhado, com o eixo do motor conectado diretamente a junta do motor seguinte. Na figura são apresentados três módulos (i a $i + 2$) posicionados com ângulos conforme a Equação 2.3, em um determinado tempo t_x .

É importante destacar que o servo motor escolhido trabalha na faixa de $[0, \pi]$, mas os valores utilizados na equação são na faixa de $[-\pi, \pi]$. Os valores obtidos da equação para o movimento do robô devem ser mapeados para a faixa correta. Para isso, sugere-se considerar $\pi/2$ do robô real como 0 da equação.

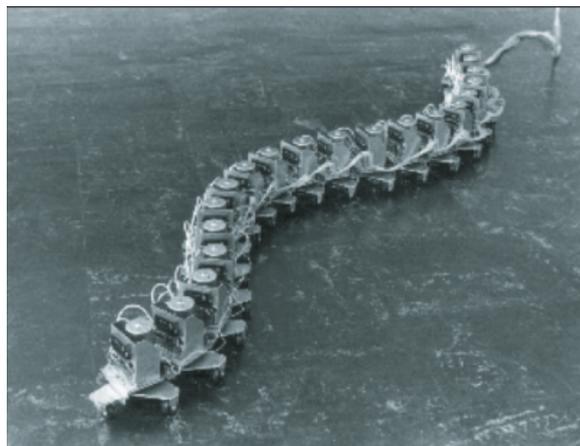
Com a diferença na faixas de valores possíveis para o movimento, talvez seja necessário realizar movimentos que o motor não é capaz de fazer, como maiores do que π e menores que 0. Ao analisar os resultados apresentados por Gomes (GOMES, 2023), é pode-se concluir que é possível realizar o movimento apenas com ângulos na faixa correta.

2.3 Projetos e protótipos de robôs cobra

Nesta seção serão apresentadas soluções no desenvolvimento de robôs cobra ao longo dos anos e em universidades pelo mundo, com foco em como cada projeto solucionou o atrito anisotrópico. Esta característica é muitas vezes ignorada, pela dificuldade de medição e de controle. Quando não, a abordagem utilizada consiste no uso de rodas ou esteiras, passivas ou ativas, o que foi descartado na realização deste trabalho, pois um dos objetivo deste é a busca por elementos móveis para solucionar a anisotropia.

Uma maneira muito simples de criar um atrito anisotrópico é a utilização de rodas passivas (sem atuação). Estas podem rolar normalmente na direção frontal mas não tem qualquer movimentação na direção lateral. O primeiro robô cobra no mundo, desenvolvido por Hirose em 1972 (HIROSE; YAMADA, 2009), utiliza essa técnica. O robô ACM-III, mostrado na Figura 2.14 demonstrou com sucesso a possibilidade de movimentação inspirada em cobras utilizando a curva serpenóide.

Figura 2.14 – Robô ACM-III

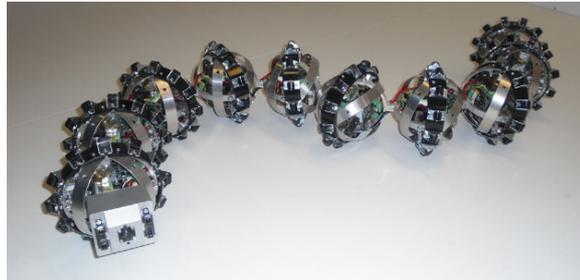


Fonte: (HIROSE; YAMADA, 2009)

Em 2011 Liljebäck (LILJEBÄCK, 2011) desenvolveu um robô que resolve o problema de maneira similar, também utilizando rodas passivas para solucionar a anisotropia.

Após quase 40 anos da solução de Hirose, Liljebäck desenvolveu o Wheeko, mostrado na [Figura 2.15](#), robô mais tecnológico e também capaz de seguir o caminho desejado, propriedade verificada a partir do desenvolvimento de testes mais precisos envolvendo visão computacional.

Figura 2.15 – Robô Wheeko



Fonte: (LILJEBÄCK, 2011)

As soluções que utilizaram rodas passivas tem a limitação de só poderem se mover em superfícies planas. Para resolver este problema e possibilitar a movimentação em diversos tipos de terreno, alguns pesquisadores passaram a utilizar rodas ou esteiras ativas. (YAMADA; HIROSE, 2006) apresenta o desenvolvimento do robô cobra modular ACM-R4, no qual cada módulo possui 2 DOF, sendo um na roda e outro na junta entre módulos, o que permite a realização de movimentos tridimensionais, como podemos ver na [Figura 2.16](#). Já o robô OT4 (BORENSTEIN; HANSEN; BORRELL, 2006) possui esteiras ativas nos quatro lados de cada módulo, além de uma atuação pneumática entre as juntas, o que permite também o movimento tridimensional, ilustrado na [Figura 2.17](#).

Figura 2.16 – Robô ACM-R4



Fonte: (YAMADA; HIROSE, 2006)

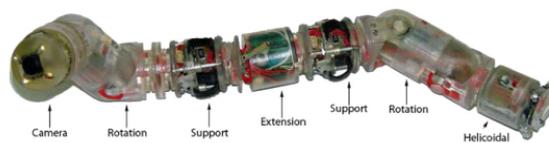
Figura 2.17 – Robô modular OT4



Fonte: (BORENSTEIN; HANSEN; BORRELL, 2006)

Por fim, existem projetos que ignoram o atrito anisotrópico, como é o caso de (BRUNETE et al., 2012) e (WRIGHT et al., 2012). O primeiro, ilustrado na Figura 2.18, focado em inspeção de tubulações, apresenta um robô heterogêneo, com módulos especializados em sensoriamento, rotação, extensão, suporte e alimentação. Como tubos são lugares estreitos, o robô consegue se mover ao expandir ou contrair diferentes módulos, sem necessidade de anisotropia. O robô *Unified* (WRIGHT et al., 2012), Figura 2.18, não dá atenção inicialmente ao atrito, e o robô não se move. Este fato mostra a importância dessa característica.

Figura 2.18 – Robô modular heterogêneo



Fonte: (BRUNETE et al., 2012)

Figura 2.19 – Robô modular *Unified*

Fonte: (WRIGHT et al., 2012)

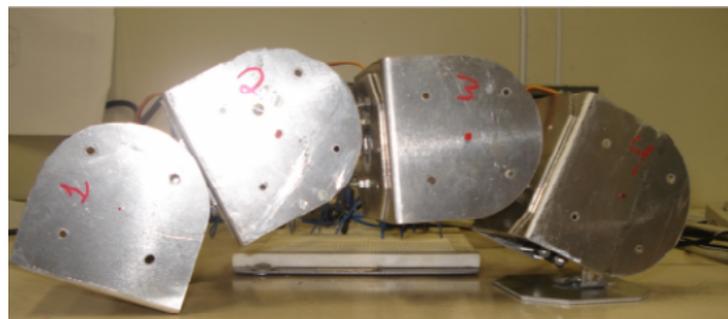
2.4 Série EREKO

Os resultados apresentados neste documento tiveram como base os trabalhos realizados desde 2010 pelo grupo Ereko (laboratório de pesquisa, educação e extensão) cujo objetivo inicial era construir um robô cobra modular e reconfigurável para diversas aplicações, desde inspeção de tubos até operações de resgate.

O projeto produziu diversas versões ao longo dos anos, com diversas versões de robôs, dentre eles: ErekoBot Beta-5 (SOUZA; DUTRA et al., 2010), ErekoBot Alpha (SOUZA; FELIPPES et al., 2012), ErekoBot Sigma (SOUSA, A. C. C. de, 2014) e (SOUSA, A. et al., 2014), ErekoBot Sigma Lily (GUIMARÃES et al., 2016) e VDM (GALEMBECK, 2018). Cada um com suas peculiaridades de construção, atuação e sensoramento.

O primeiro protótipo funcional desenvolvido pelo grupo foi o ErekoBot $\beta 5$. Sua estrutura foi feita em chapas de aço dobrada e não possuía nem fonte de alimentação, nem microcontrolador embarcado. Cada módulo possuía quatro faces com perfurações para ligação com outros módulos, o que possibilitou a obtenção de movimentos *pitch-pitch*, *yaw-yaw* e *pitch-yaw*. Um robô formado por quatro módulos pode ser vistos na [Figura 2.20](#). O robô conseguiu se movimentar, mas de forma lenta e instável, pelo seu tamanho e peso.

Figura 2.20 – Robô ErekoBot Beta 5 com quatro módulos



Fonte: (SOUZA; DUTRA et al., 2010)

Para solucionar os problemas de peso, dificuldade de conexão e controle encontrados no modelo ErekoBot $\beta 5$, foi desenvolvido o modelo ErekoBot α . O módulo construído com base nesse modelo possui uma massa de 48g e ocupa um volume de 40mm \times 40mm \times 40mm, sendo fabricado de fibra de vidro, contra 150g e 70mm \times 70mm \times 70mm de seu predecessor. A conexão entre módulos é feita por tiras de Velcro, que suportam até 600N de força (considerando que está fixado com área e pressão suficientes). De forma similar ao modelo anterior, possui quatro faces disponíveis para fixação, cada uma possuindo ambos os tipos de tecidos para Velcro, macho e fêmea.

Tanto alimentação quanto o microcontrolador estão embarcados. Além disso já existe um protocolo de comunicação entre módulos, que utiliza rádio frequência. Em simulação, o modelo apresentou uma movimentação consideravelmente melhor que no Beta5, nas

configuração *pitch-pitch* e *pitch-yaw*. Um módulo do ErekoBot Alpha pode ser visto na Figura 2.21.

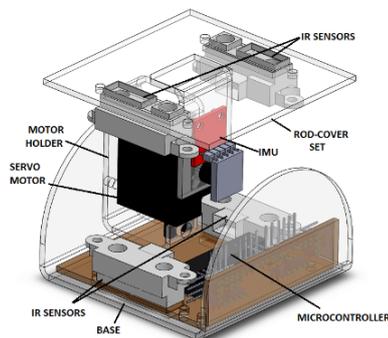
Figura 2.21 – Robô ErekoBot Alpha



Fonte: (SOUZA; FELIPPES et al., 2012)

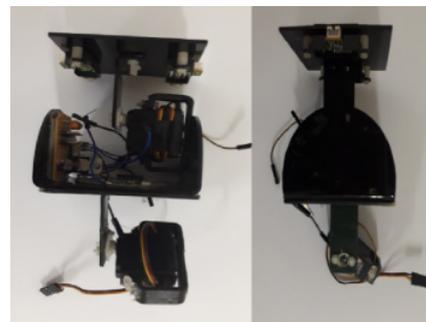
O robô seguinte buscou expandir a capacidade de sensoriamento do módulo. O ErekoBot Sigma, que posteriormente foi expandido para o ErekoBot Sigma Lily (que possui esse nome por utilizar o Arduino Lilypad como microcontrolador), pode ser visto na Figura 2.22, é uma atualização do modelo Alpha. Nele foram adicionados sensores de proximidade, aceleração e orientação (giroscópio). A fixação deixa de ser por velcro e a alimentação volta a ser feita por meio de fonte externa. Para este módulo foi utilizada a configuração *pitch-pitch*, uma curva serpenóide. No movimento foram observados pontos de instabilidade, além da influência do atrito no movimento, o que inspirou trabalhos posteriores, como (GALEMBECK, 2018) e (GOMES, 2023).

Figura 2.22 – Módulo Sigma (projeto CAD) e Módulo Sigma-Lily montado



(a) Módulo Sigma

Fonte: (SOUSA, A. C. C. de, 2014)



(b) Módulo Sigma Lily

Fonte: (GUIMARÃES et al., 2016)

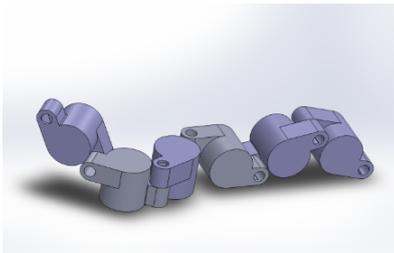
Com os resultados obtidos durante o desenvolvimento da série Sigma descobriu-se a necessidade de se estudar a influência do atrito na movimentação. Com o estudo da natureza, mais especificamente das escamas da Cobra Real Californiana (*Lampropeltis*

getula californiae), Baun *et al.*, (BAUM *et al.*, 2014), concluiu que as escamas possuem estruturas microscópicas que possibilitam a existência de um atrito anisotrópico, sendo essa característica necessária para o movimento, o que deve ser copiado na criação de cobras robóticas.

Com a necessidade de se ter um atrito anisotrópico em mente Galembeck desenvolve a série VDM, Figura 2.23, (GALEMBECK, 2018). Esse módulo é pensado para possuir internamente a sua estrutura todos os atuadores e sensores necessários, além de possuir uma superfície plana para a fixação de uma placa de atrito que tenta imitar as escamas de cobras. O módulo é formado por um cilindro e dois braços de tamanho conhecido, dispostos de forma a impedir que o robô role. Na seção 3.1 entra-se em mais detalhes no desenvolvimento feito por Galembeck.

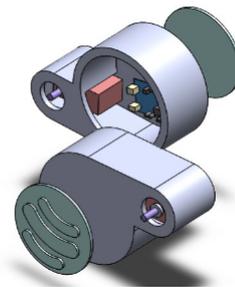
Figura 2.23 – Robô e módulo da série VDM

(a) Robô de configuração heterogênea



Fonte: (GALEMBECK, 2018)

(b) Módulo VDM



Fonte: (GALEMBECK, 2018)

Anisotropia é a característica de um material ou corpo de possuir propriedades diferentes a depender da direção. Para a movimentação do robô existe a necessidade da existência de um atrito anisotrópico entre sua estrutura e o solo. Para isso surge a hipótese dessa característica poder ser alcançada alterando o formato do contato entre os materiais, o que foi explorado de maneira experimental neste trabalho e simulado por (GOMES, 2023).

Neste trabalho retomam-se os estudos da anisotropia iniciados com o VDM, com um robô apenas em superfícies planas. São criadas diferentes placas, fixadas à base do módulo, que entram em contato com o solo para avaliar a possibilidade de se criar uma estrutura rígida que possibilite a obtenção dessa característica, além de ser proposto um protocolo de comunicação para controle do robô.

3 Prototipagem do módulo

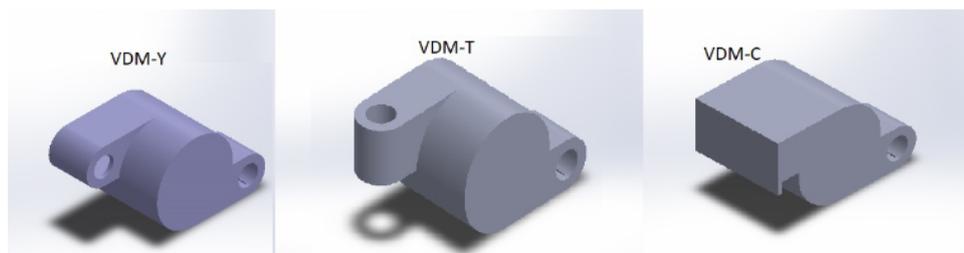
Neste Capítulo será apresentado com mais detalhes o módulo VDM proposto por (GALEMBECK, 2018). Este não possui uma definição de dimensões ou da maneira como encaixes e fixações devem ser feitas, dando mais atenção a geometria geral da sua estrutura e a existência de uma "placa de atrito". A partir deste módulo são apresentadas mudanças e melhorias feitas em software CAD. O novo módulo proposto foi prototipado por manufatura aditiva.

3.1 Modelo VDM

Em 2018, Galembeck (GALEMBECK, 2018) propôs um modelo de módulo de robô cobra chamado VDM. Ele engloba todos os estudos e resultados obtidos na Série EREKO, com a possibilidade de utilização de configurações *pitch-pitch*, *yaw-yaw* e *pitch-yaw*. O foco não é na estrutura em si, mas na necessidade da geometria atender três características básicas: atuador posicionado em um braço de tamanho conhecido; espaço interno para alocação dos componentes; e superfície plana para suporte de uma placa com a propriedade de atrito anisotrópico.

Foram propostos três modelos básicos. VDM-Y, que tem os atuadores (e conexão com o atuador do módulo seguinte, paralelos entre si; VDM-T, que estes são perpendiculares; e VDM-C, que não possui atuador ou possui apenas uma conexão com outros módulos, podendo ser utilizado como cabeça ou cauda do robô. O VDM-C é pensado para aplicações que necessitem de mais sensores e uma configuração heterogênea. Na Figura 3.24 é possível visualizar a geometria geral dos modelos.

Figura 3.24 – Geometrias do modelo VDM



Fonte: (GALEMBECK, 2018)

As placas de atrito anisotrópico proposta por Galembeck são divididas em duas partes: elementos centrais e laterais. Os elementos centrais são arcos de círculos extrudados, com um acabamento arredondado em suas extremidades. Os elementos laterais são hexágonos,

também extrudados. Um exemplo de placa porposta pode ser visto na [Figura 3.25](#). Galembeck propõe diferentes densidades e configurações para esses elementos de modo a simular a função das escamas do corpo das cobras e produzir um atrito anisotrópico, o que foi testado e analisado neste trabalho.

Figura 3.25 – Geometrias do modelo VDM



Fonte: (GALEMBECK, 2018)

O projeto do modelo VDM, mais especificamente o VDM-Y, foi aqui analisado. Na análise foi identificada a necessidade de realizar alterações que possibilitassem a prototipação. As modificações na modelagem foram realizadas em *software* CAD e módulo, incluindo as placas de atrito anisotrópico, foram fabricadas por meio de manufatura aditiva com o material PLA.

3.2 Alterações propostas

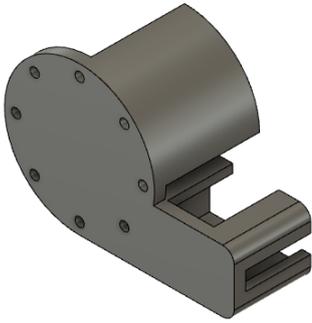
Em um primeiro momento foi analisado o módulo proposto por Galembeck (2018). Nele é dada atenção apenas à geometria geral do modelo, não sendo desenvolvidas formas de fixação da tampa, dos componentes eletrônicos, ou da placa de atrito, nem são definidas dimensões gerais para o módulo.

Na [Figura 3.26](#) é possível observar uma representação do modelo proposto por Galembeck (2018). Nele, a tampa, a placa de atrito e o motor são fixados apenas por interferência, o que não é ideal pois torna sua fixação frágil. Além disso, a tampa, vista na [Figura 3.27](#), necessita de pinos que são frágeis com a tecnologia de fabricação escolhida, manufatura aditiva.

Por fim, a placa de atrito, que pode ser vista na [Figura 3.28](#), também possui pinos, mas estes são mais baixos e mais grossos, o que os torna mais robustos. Entretanto não existe nenhuma forma de fixação específica para a placa.

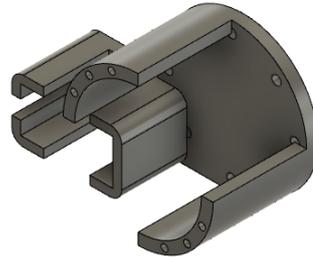
Figura 3.26 – Placa de atrito inicial

(a) Corpo do módulo vista 1



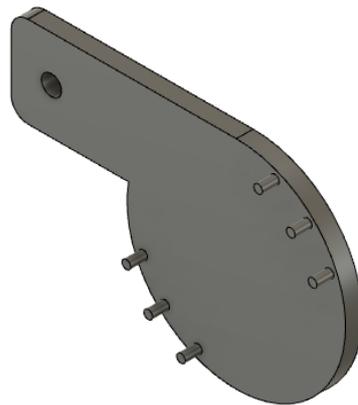
Fonte: Figura do autor

(b) Corpo do módulo vista 2



Fonte: Figura do autor

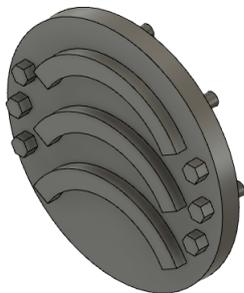
Figura 3.27 – Tampa do módulo



Fonte: Figura do autor

Figura 3.28 – Placa de atrito inicial

(a) Placa de atrito - superior



Fonte: Figura do autor

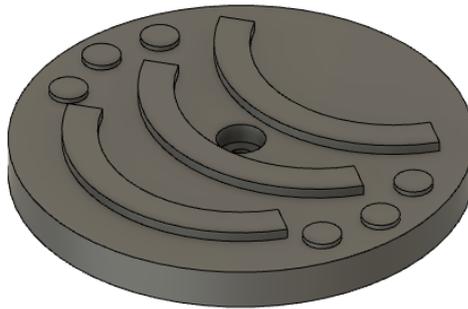
(b) Placa de atrito - inferior



Com base nesses aspectos são propostas melhorias para a estrutura física do módulo, buscando uma fixação mais segura de todos os elementos envolvidos.

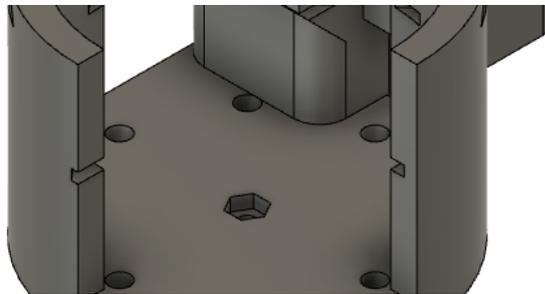
Para fixar a placa de atrito no módulo foi criado um furo na base do corpo com formato hexagonal para suportar uma porca para parafuso M3. Essa porca é fixada ao módulo por interferência. Como o aço é mais duro que o plástico, este se deforma e se ajusta com a inserção da porca, o que torna a fixação segura. Na placa de atrito é feito um furo circular não passante, que tem função de embutir a cabeça do parafuso para que este não interfira no movimento. As mudanças podem ser vistas na [Figura 3.29](#) e na [Figura 3.30](#).

Figura 3.29 – Vista superior da placa de atrito, mudanças para fixação



Fonte: Figura do autor

Figura 3.30 – Detalhe da região onde se posiciona o motor no módulo

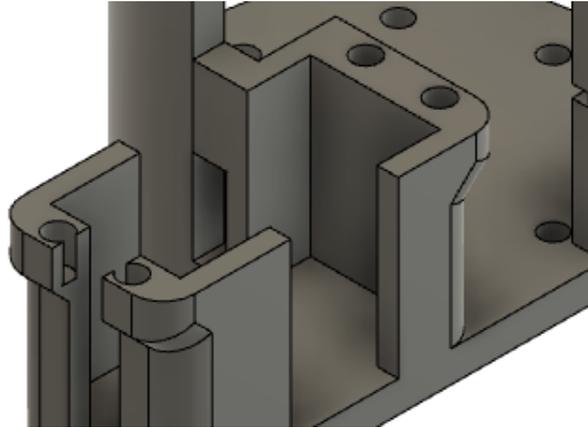


Fonte: Figura do autor

Para melhorar a fixação do motor, foram feitas alterações dimensionais, além da adição de estruturas para melhor suportar a fixação do motor, o que pode ser visto na [Figura 3.31](#). As dimensões finais do módulo são 56mm × 65mm × 132mm

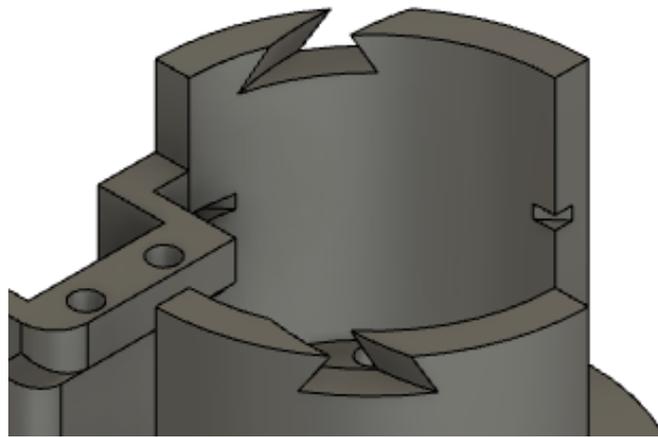
Por fim, para fixar a tampa ao corpo do módulo, foi desenvolvida uma geometria com formato de "rabo de andorinha", com deslizamento de forma circular. Para encaixar e desencaixar a tampa é necessária uma força conjunta nas direções vertical e horizontal, o que tornou a fixação eficaz. Além disso essa construção permite a fixação sem o uso de parafusos e porcas adicionais. As modificações no corpo podem ser vistas na [Figura 3.32](#) e na tampa na [Figura 3.33](#). Na [Figura 3.34](#) é possível visualizar o modelo final fabricado.

Figura 3.31 – Detalhe da região onde se posiciona o motor no módulo



Fonte: Figura do autor

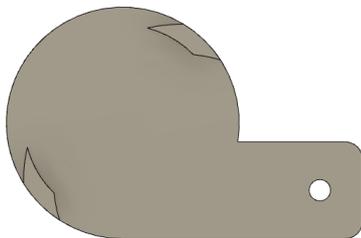
Figura 3.32 – Detalhe das entranças para a tampa no corpo



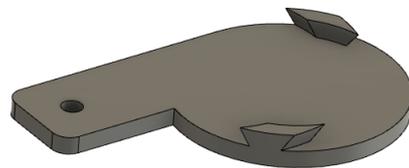
Fonte: Figura do autor

Figura 3.33 – Tampa final com rabo de andorinha

(a) Detalhe das entranças para a tampa no corpo



(b) Vista diagonal superior da tampa, com estruturas rabo de andorinha



Fonte: Figura do autor

Figura 3.34 – Modulo fabricado



Fonte: Figura do autor

4 Atrito

Atrito, relativo a força que resiste ao movimento e que é muitas vezes ignorado ou assumido grande o suficiente em ponderações matemáticas e de engenharia, é indispensável para a movimentação. Sem ele (ou com uma força muito baixa), rodas “patinam” sobre solo, e pés e mãos podem escorregar e causar acidentes, como quando ocorre em um piso molhado. Entretanto atrito excessivo também é considerado um problema comum na engenharia, causando desgaste de peças, e necessitando da reposição constante de graxas e lubrificantes em máquinas. Por outro lado também existe a possibilidade do uso favorável do atrito para a fabricação de peças metálicas em processos de soldagem, já existindo máquinas especializadas nessa operação, na qual o contato entre a ferramenta e as peças pode ultrapassar os 1000°C (NANDAN; DEBROY; BHADESHIA, 2008). Neste capítulo é apresentada inicialmente uma visão geral sobre essa propriedade, e posteriormente testes práticos para avaliar o atrito em elementos chamados “placas de atrito” a serem introduzidos nos módulos do robô cobra.

4.1 Visão geral

O atrito é inerente ao contato entre os corpos, é uma propriedade complexa, cuja variação não depende apenas do material de um corpo, mas da interação entre dois materiais. Seguem três leis simples:

1. Primeira Lei de Amonton: A força de atrito é diretamente proporcional à Força Normal atuante entre as áreas de contato;
2. Segunda Lei de Amonton: A força de atrito independe da área de contato aparente;
3. Lei de Coulomb: A força de atrito dinâmico independe da velocidade de escorregamento

Existem duas maneiras de se quantificar o atrito para calcular as forças externas em corpos considerados rígidos, **estático** e **dinâmico**. O primeiro surge em objetos que estão parados e o segundo após o início da movimentação. Em ambos os casos aparece uma proporcionalidade à força normal, seguindo a primeira Lei de Amonton, como na [Equação 4.1](#), onde F_{at} é a força de atrito, μ é o **coeficiente de atrito**, e N a força normal aplicada.

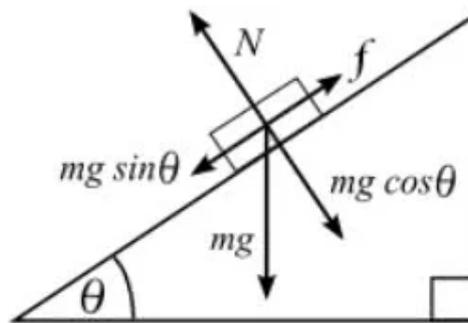
$$F_{at} = \mu N \quad (4.1)$$

4.2 Análise do atrito dinâmico em plano inclinado

O módulo proposto conta com a presença de “placas de atrito”. Essas placas são elementos fixados a cada módulo com o objetivo de criar um atrito anisotrópico com a superfície, permitindo o movimento. Foi observado por Gomes (GOMES, 2023) através de simulações que é necessário uma pequena diferença de atrito entre as direções frontais e laterais de cada módulo. Além disso, foi observado que quanto menor o coeficiente de atrito frontal da placa, menos a diferença entre os coeficientes de atrito entre as direções é relevante. Essas placas são fixadas aos módulos do robô cobra com o objetivo de obter um atrito anisotrópico, permitindo que o robô de mova de maneira correta.

O teste feito é uma análise de movimento em plano inclinado como o representado na Figura 4.35.

Figura 4.35 – Plano inclinado



Fonte: <https://www.todamateria.com.br/plano-inclinado/>

Considerando um corpo de massa m , deslizando em um plano inclinado com angulação θ , pode-se construir o diagrama de corpo livre para as forças conforme a Figura 4.35.

A força peso do corpo é primeiramente decomposta em duas seções, apresentadas na Equação 4.2, onde g é a aceleração da gravidade e F_{Px} e F_{Py} são resultantes da decomposição da força peso nos sentidos paralelo e perpendicular ao plano inclinado, respectivamente.

$$\begin{cases} F_{Px} = mg \sin(\theta) \\ F_{Py} = mg \cos(\theta) \end{cases} \quad (4.2)$$

Como enunciado na primeira lei de Amonton, a força de atrito é diretamente proporcional à força normal. Assim, para o diagrama de corpo livre apresentado tem-se que:

$$\begin{cases} N = mg \cos(\theta) = F_{Py} \\ F_{at} = \mu \cdot N = \mu mg \cos(\theta) \end{cases} \quad (4.3)$$

Assim chegamos na [Equação 4.4](#), onde F_R é a força resultante ao processo, N é a força normal, F_{at} é a força de atrito e μ é o coeficiente de atrito. A partir dessa, e do somatório das forças tem-se:

$$F_R = F_{Px} - F_{at} \quad (4.4)$$

$$ma = mg\text{sen}(\theta) - \mu mg\text{cos}(\theta) \quad (4.5)$$

Como deseja-se calcular o coeficiente de atrito entre os corpos, basta isolar o termo correspondente:

$$\mu = \frac{g\text{sen}(\theta) - a}{g\text{cos}(\theta)} \quad (4.6)$$

A aceleração da gravidade e a inclinação do plano são valores constantes, definidos previamente (considera-se $g = 9,78m/s^2$) à realização dos testes. O termo restante, a é a aceleração do movimento.

No teste, é medido o tempo do escorregamento. Temos também a distância percorrida e a massa do corpo. As equações básicas do movimento uniformemente variado podem ser vistas na [Equação 4.7](#), onde S e S_o são as posições finais e iniciais, respectivamente, onde V e V_o são as velocidades finais e iniciais, respectivamente, a é a aceleração do corpo, que para esse movimento é constante e t é o tempo do movimento.

$$\begin{cases} S = S_o + V_o t + \frac{at^2}{2} \\ V = V_o + at \\ V^2 = V_o^2 + 2a\Delta S \end{cases} \quad (4.7)$$

Com os testes, temos a distância percorrida e o tempo, e desejamos calcular a aceleração. Sabe-se também que tanto a posição inicial quanto a velocidade inicial são zero. Assim, utilizando a primeira equação presente em [Equação 4.7](#), podemos obter a aceleração por meio dos termos conhecidos, visto em [Equação 4.8](#).

$$a = \frac{\Delta S \times 2}{t^2} \quad (4.8)$$

4.3 Testes de escorregamento

Deseja-se inicialmente testar a possibilidade de criar um atrito anisotrópico utilizando apenas a geometria da placa de atrito, com uma estrutura rígida. Para isso foi construído

uma plataforma de testes, que pode ser vista na 4.36. A plataforma é feita de MDF com uma lâmina de fórmica branca colada, o que torna a superfície lisa, o que diminui o atrito entre esse instrumento e a placa de atrito.

Figura 4.36 – Plataforma para testes de atrito



Fonte: Figura do autor

Na base da plataforma, tem-se uma dobradiça, e na sua lateral existe uma estrutura com furos, onde é posicionada uma cavilha que sustenta a rampa de escorregamento e permite a regulagem para 5 inclinações diferentes: 20°, 30°, 45°, 50° e 55°, podendo facilmente ser expandida para outras inclinações. Na plataforma existem marcações feitas em caneta permanente para uniformizar as medições dentro de um intervalo definido. A distância entre as marcações é de 360mm.

Todas as placas de atrito foram fabricadas utilizando manufatura aditiva com o material PLA. Para o teste foi estimado que o módulo pronto teria em torno de 140g, considerando o peso da estrutura, fabricado em termoplástico, do peso do motor e dos demais componentes eletrônicos, valor que foi utilizado no corpo de teste, que pode ser visualizado na Figura 4.37. O corpo de teste é um cilindro de 65mm de diâmetro e 30mm de altura. Para alcançar o peso de 140g foi utilizado chumbo para pesca, por ser um material denso e de fácil acesso, fixado com fita branca.

A seguir são apresentadas as 9 placas propostas, bem como um resumo dos resultados encontrados, que serão apresentados na seção seguinte.

4.4 Descrição das placas de atrito

4.4.1 Placa 0

O que foi chamado aqui como Placa 0 é o corpo de teste sem placa, medida inicial para controle. Com essa placa toda a superfície do corpo, uma circunferência de 65mm de diâmetro, encosta na rampa. Por isso o coeficiente de atrito deste é maior que o de todas as outras placas.

Figura 4.37 – Corpo de teste de 140g



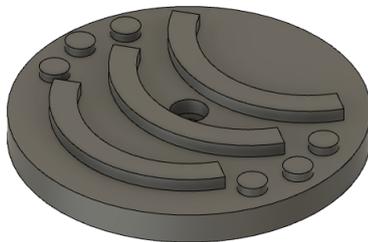
Fonte: Figura do autor

4.4.2 Placas 1 e 2

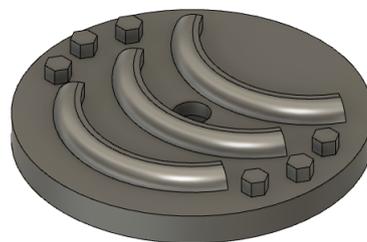
As placas 1 e 2 possuem um formato similar. Elas foram feitas baseadas no modelo proposto por (GALEMBECK, 2018). Nela existem dois tipos de estruturas, as centrais, formadas por arcos de círculos, e as laterais, formadas por trios de prismas hexagonais. A diferença entre as estruturas está no fato de que na Placa 2 as estruturas centrais são arredondadas na direção frontal ao movimento, o que diminui a superfície de contato da placa com o solo, mas essa diferença não causou uma alteração significativa no coeficiente de atrito.

Figura 4.38 – Placas 1 e 2 em *software* CAD. Aqui é possível visualizar o arredondamento dos elementos centrais da placa.

(a) Placa 1 em *software* CAD.



(b) Placa 2 em *software* CAD.

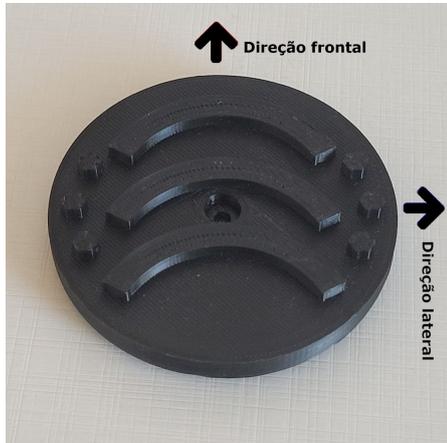


Fonte: Figura do autor

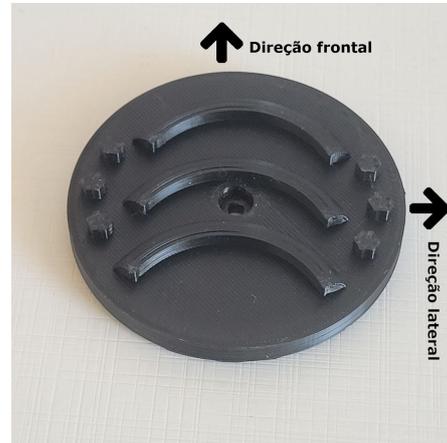
Na Figura 4.38 é possível observar a diferença, em *software* CAD, entre as placas, enquanto na Figura 4.39 é possível visualizar as placas fabricadas, juntamente com a indicação das direções frontal e lateral.

Figura 4.39 – Placas 1 e 2 fabricadas em PLA preto. A direção dos testes de escorregamento foi feita conforme a figura

(a) Placa 1 fabricada e com indicação de direções



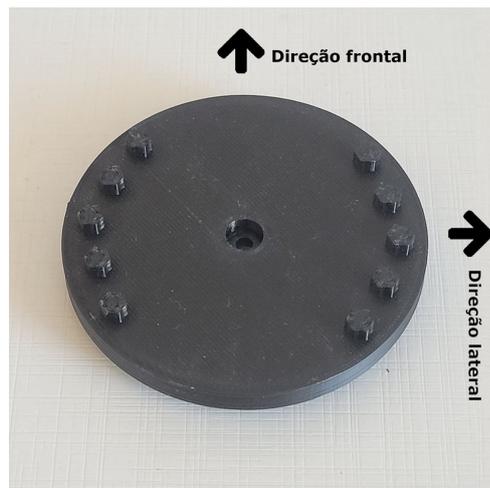
(b) Placa 2 fabricada e com indicação de direções



Fonte: Figura do autor

4.4.3 Placa 3

Ao observar as Placas 1 e 2, juntamente com os resultados aprestados por Gomes, escolheu-se fabricar uma placa similar as anteriores, mas removendo os elementos centrais e aumentando os laterais. A placa pode ser visualizada na [Figura 4.40](#). Os testes nessa placa necessitaram de atenção especial, pois como a placa não possui os elementos centrais, ela perdeu o contato com a rampa em alguns dos testes. Quando isso ocorreu essa medida foi descartada.



Fonte: Figura do autor

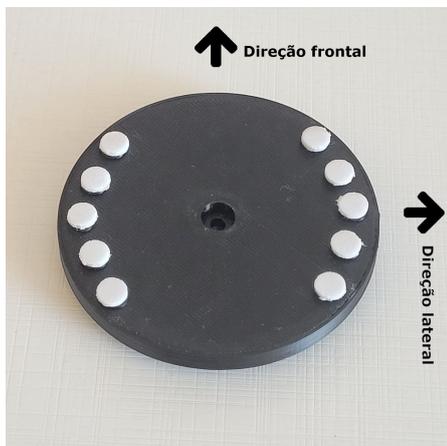
Figura 4.40 – Placa 3 fabricada em PLA preto e com indicação de direções.

4.4.4 Placas 4 e 5

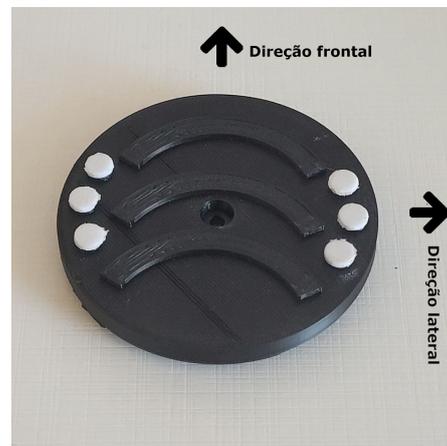
Para as Placas 4 e 5 (não mostradas nas tabelas) decidiu-se alterar o material que entra em contato com a rampa. Os elementos laterais das placas 1 e 3 foram rebaixados em 0,75mm e neles foi colado círculos de EVA (que possuem 0,75mm de espessura), cortados utilizando um perfurador de papel de 5mm. As placas podem ser vistas na [Figura 4.41](#).

Figura 4.41 – Placas 4 e 5 fabricadas em PLA preto. A direção dos testes de escorregamento foi feita conforme a figura. Os círculos em branco são feitos de EVA utilizando um furador de papel de 5mm

(a) Placa 4 fabricada e com indicação de direções



(b) Placa 5 fabricada e com indicação de direções



Fonte: Figura do autor

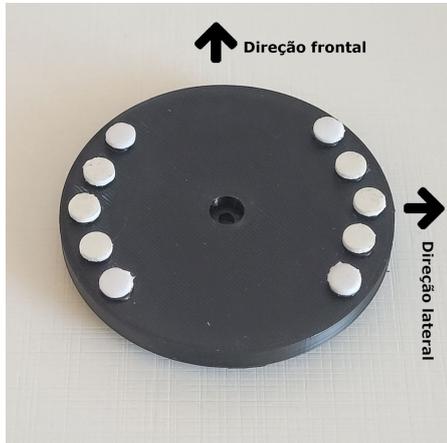
O atrito entre o EVA e o MDF foi muito alto, e o corpo não deslizou. Nesse momento a inclinação da rampa foi aumentada, mas não foi encontrada uma inclinação na qual ocorresse o deslizamento sem que o corpo tombasse ou perdesse o contato com a rampa. Assim essas placas foram descartadas dos resultados.

4.4.5 Placas 6 e 7

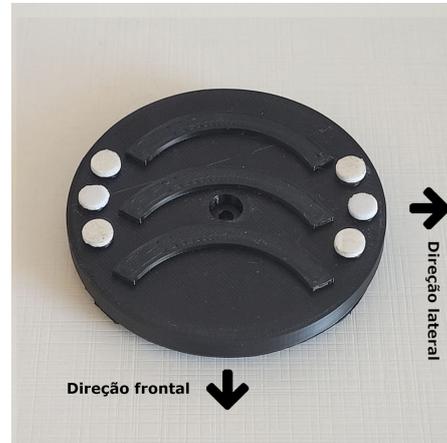
De forma similar as placas 4 e 5, as placas 6 e 7 utilizam o mesmo modelo das placas 1 e 3 com os elementos laterais rebaixados, mas acima do círculo de EVA tem-se um círculo de fita crepe com o objetivo de trocar o material de contato com a placa e conseqüentemente o atrito. Essa diferença no material permitiu que o movimento ocorresse, mas a diferença do coeficiente de atrito entre as direções se tornou muito baixa. As placas podem ser vistas na [Figura 4.42](#).

Figura 4.42 – Placas 6 e 7 fabricadas em PLA preto. A direção dos testes de escorregamento foi feita conforme a figura. Os círculos de EVA+fita crepe foram feitos colando a fita por cima do EVA e cortando com um furador de papel de 5mm.

(a) Placa 6 fabricada e com indicação de direções



(b) Placa 7 fabricada e com indicação de direções

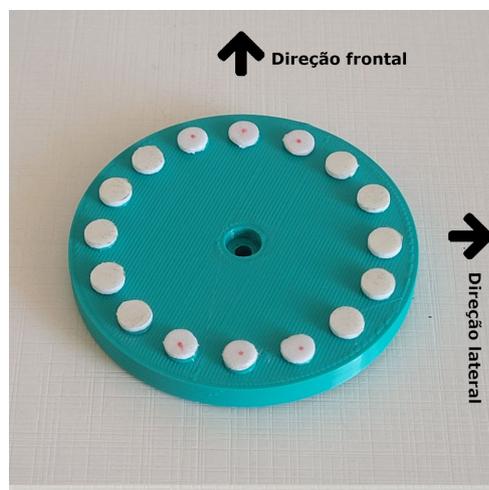


Fonte: Figura do autor

4.4.6 Placa 8

Na placa 8 tenta-se corrigir o problema da falta de apoio central que aparece na placa 3, juntamente com diminuir o atrito da placa 5 para possibilitar o movimento. A solução encontrada foi utilizar estruturas semelhantes as laterais da placa 1, na total extensão da circunferência da placa. Nela foram colados círculos de 5mm de EVA e de EVA + fita crepe. Foram colados 3 círculos de EVA, 5 de EVA + fita, 3 círculos de EVA, 5 de EVA + fita, totalizando 16 elementos, o que pode ser visto na [Figura 4.43](#).

Figura 4.43 – Placa 8 fabricada em PLA verde-água e com indicação de direções. A cor não interferiu nos testes, sendo a mudança feita por disponibilidade. Na figura os círculos de EVA estão marcados com um ponto vermelho em seu centro.

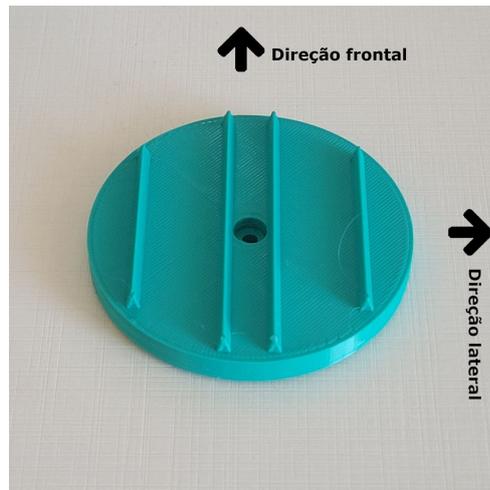


Fonte: Figura do autor

4.4.7 Placa 9

A placa 9 foi feita com a ideia de minimizar a seção frontal e maximizar a seção lateral da placa. Apesar dos resultados mostrarem a maior anisotropia entre todas as placas, esta foi mais instável durante testes. A placa pode ser vista na [Figura 4.44](#).

Figura 4.44 – Placa 9 fabricada em PLA verde-água e com indicação de direções.



Fonte: Figura do autor

4.5 Resultados

Nos testes foi medido o tempo de escorregamento, sendo seu início e fim definido conforme a [Figura 4.45](#). Assim, a distância percorrida total foi de 360mm. O teste consiste da medida do tempo de escorregamento de cada placa na distância proposta. Para isso, cada escorregamento foi gravado a 60fps, e a análise foi feita através do *software* Tracker, que permite a realização de medidas físicas, e a contagem de frames de maneira mais simplificada. Com esse *software* foi possível obter uma precisão de três casas decimais para o tempo (em segundos), mas o intervalo de tempo entre cada frame é de 0,017s, sendo este considerado o erro da medida.

Figura 4.45 – Início e fim dos testes de escorregamento

(a) A contagem de tempo de cada teste se inicia quando a traseira do robô encosta na linha



(b) A contagem de tempo de cada teste termina quando a frente do robô encosta na linha



Fonte: Figura do autor

Os testes foram realizados com a inclinação de 30° . Também foram realizados testes com inclinações maiores que 30° , mas nestes casos o corpo perdeu contato com a rampa em alguns pontos e momentos, o que invalida a medição. Em especial, para as placas 4 e 5, o atrito estático foi grande o suficiente para impedir o movimento (na inclinação de 30°), mas para inclinações maiores o corpo "tombou", por conta do seu centro de massa, o que também invalida a medição.

Para cada placa foram realizadas 10 medições em cada direção. Os valores de tempo de escorregamento podem ser vistos na [Tabela 4.1](#). Utilizando os resultados dos tempos de escorregamento é possível calcular o desvio padrão, que mostrou que os valores estão consistentes, com o valor do desvio padrão muito próximo ao erro.

Com a média dos valores obtidos experimentalmente pode-se calcular a aceleração, utilizando a [Equação 4.8](#). Esses resultados são apresentados na [Tabela 4.2](#).

Tabela 4.1 – Tempos de escorregamento

	Direção	Tempo de descida de cada medida[s]										Média [s]
Placa 0	Frente	0,550	0,550	0,617	0,649	0,666	0,683	0,683	0,683	0,716	0,666	0,666
Placa 1	Frente	0,550	0,549	0,566	0,583	0,616	0,633	0,584	0,583	0,617	0,584	0,584
	Lado	0,583	0,533	0,567	0,567	0,567	0,566	0,583	0,566	0,583	0,566	0,567
Placa 2	Frente	0,553	0,567	0,566	0,600	0,583	0,600	0,600	0,583	0,583	0,600	0,583
	Lado	0,616	0,599	0,617	0,583	0,583	0,599	0,584	0,584	0,600	0,584	0,592
Placa 3	Frente	0,500	0,566	0,593	0,599	0,600	0,600	0,617	0,633	0,634	0,600	0,600
	Lado	0,616	0,600	0,600	0,616	0,616	0,617	0,617	0,617	0,633	0,617	0,6165
Placa 6	Frente	0,683	0,683	0,650	0,667	0,666	0,633	0,633	0,65	0,634	0,649	0,650
	Lado	0,633	0,616	0,650	0,617	0,633	0,616	0,616	0,600	0,616	0,633	0,617
Placa 7	Frente	0,600	0,600	0,600	0,633	0,600	0,566	0,583	0,616	0,583	0,617	0,600
	Lado	0,616	0,633	0,599	0,617	0,583	0,583	0,600	0,600	0,583	0,583	0,600
Placa 8	Frente	0,633	0,617	0,633	0,600	0,616	0,600	0,600	0,600	0,617	0,600	0,608
	Lado	0,650	0,650	0,633	0,650	0,650	0,633	0,633	0,650	0,633	0,633	0,642
Placa 9	Frente	0,567	0,600	0,650	0,650	0,666	0,666	0,650	0,683	0,667	0,700	0,658
	Lado	0,583	0,600	0,583	0,600	0,516	0,567	0,600	0,599	0,583	0,600	0,591

Fonte: Dados do autor

A partir dos dados de escorregamento (aceleração) e utilizando a [Equação 4.6](#) é possível calcular o coeficiente de atrito para cada placa. Dos resultados, apresentados na

Tabela 4.2 – Resultados iniciais do teste de escorregamento

	Direção	Tempo de descida [s] (média)	Desvio padrão [s]	Aceleração [$\frac{m}{s^2}$]
Placa 0	Frente	0,666	0,057	1,623
Placa 1	Frente	0,584	0,028	2,115
	Lado	0,567	0,015	2,240
Placa 2	Frente	0,583	0,017	2,118
	Lado	0,592	0,013	2,058
Placa 3	Frente	0,600	0,039	2,000
	Lado	0,617	0,009	1,894
Placa 6	Frente	0,65	0,019	1,704
	Lado	0,6165	0,014	1,894
Placa 7	Frente	0,600	0,020	2,000
	Lado	0,600	0,018	2,003
Placa 8	Frente	0,608	0,014	1,948
	Lado	0,642	0,009	1,750
Placa 9	Frente	0,658	0,039	1,663
	Lado	0,591	0,026	2,061

Fonte: Dados do autor

Tabela 4.3 observa-se que é possível obter uma pequena diferença no coeficiente de atrito alterando a geometria da placa, mas não é possível obter um atrito anisotrópico suficiente, em torno de 50% de razão, considerando os resultados obtidos em simulação por Carvalho (GOMES, 2023). A razão entre os atritos nas direções frontal e lateral foi muito próximo de 1 para a maioria dos casos. A placa 9, que apresentou maior anisotropia, também foi a placa que apresentou maior desvio padrão na sua medida, incorreções devido a variações da geometria, fabricação ou do material.

Tabela 4.3 – Coeficientes de atrito

	Direção	Coefficiente de atrito	Razão (Lado/Frente)
Placa 0	Frente	0,386	1,000
Placa 1	Frente	0,328	0,955
	Lado	0,313	
Placa 2	Frente	0,327	1,022
	Lado	0,334	
Placa 3	Frente	0,341	1,037
	Lado	0,354	
Placa 6	Frente	0,376	0,940
	Lado	0,354	
Placa 7	Frente	0,341	1,000
	Lado	0,341	
Placa 8	Frente	0,347	1,067
	Lado	0,371	
Placa 9	Frente	0,381	0,877
	Lado	0,334	

Fonte: Dados do autor

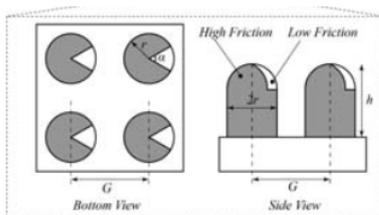
4.6 Trabalhos futuros

Com os resultados obtidos nos testes de escorregamento e presentes na [Tabela 4.3](#) conclui-se que é possível obter diferentes coeficientes de atrito com diferentes estrutura de placas, principalmente com a variação do material e do formato da superfície em contato com o solo, mas não é possível obter uma anisotropia considerável com uma estrutura rígida.

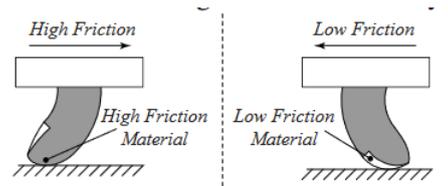
As escamas de cobras e outros répteis não são rígidas. São parte de sua pele, oferecendo proteção, camuflagem e possibilitando seu movimento. Esses animais também podem mover suas escamas, sendo o atrito destas diferentes com o animal acordado ou dormindo ([MARVI et al., 2015](#)), outro indicativo da necessidade de se utilizar elementos minimamente móveis.

Figura 4.46 – Elementos para placa de atrito.

- (a) Vista superior e lateral dos elementos flexíveis para obtenção de atrito anisotrópico. Em cinza material flexível e de alto atrito e em branco material rígido de baixo atrito



- (b) Flexão dos elementos. Nota-se que nas diferentes direções, materiais diferentes estão em contato com o solo.



Fonte: (TA; UMEDACHI; KAWAHARA, 2018)

Ta et. al. (TA; UMEDACHI; KAWAHARA, 2018) apresenta o desenvolvimento de um robô com corpo longo, que se move ao contorcer seu corpo para direita ou esquerda e também necessita de atrito anisotrópico. O grupo alcançou a anisotropia utilizando uma placa fabricada com dois materiais, sendo um rígido e outro flexível.

Figura 4.47 – Tabela de coeficientes de atrito para as direções dianteira, traseira e lateral, respectivamente.

$\mu_b \rightarrow \mu_t$	Fabric			Paper			White Board		
	μ_f	μ_b	μ_t	μ_f	μ_b	μ_t	μ_f	μ_b	μ_t
● F0	1.43	1.43	1.43	1.73	1.73	1.73	2.25	2.25	2.25
◐ F1	0.93	1.19	1.19	1.48	1.80	1.80	0.70	1.28	1.28
◑ F2	0.58	1.19	0.88	0.78	1.60	1.19	0.90	1.88	1.39
◒ F3	0.31	0.53	0.31	0.45	0.67	0.45	0.42	0.58	0.42
◓ F4	0.31	0.31	0.31	0.45	0.45	0.45	0.42	0.42	0.42
◔ F5	0.60	0.60	0.67	0.67	0.67	0.93	0.70	0.70	0.75
◕ F6	0.67	0.67	0.60	0.93	0.93	0.67	0.75	0.75	0.70
◖ F7	1.28	1.28	1.28	1.54	1.54	1.54	2.75	2.75	2.75

Fonte: (TA; UMEDACHI; KAWAHARA, 2018)

Na placa desenvolvida pelo grupo japonês é formada por cilindros, com o topo

arredondado, feito em material flexível (e de alto atrito), com uma pequena região fabricada com material rígido (e de baixo atrito), conforme [Figura 4.46](#).

Foram propostas diversas organizações para os dois materiais, conforme [Figura 4.47](#). A organização que melhor atende aos requisitos do robô cobra (coeficiente de atrito lateral maior que o frontal) é a marcada por F1, considerando o material *White board* como similar a da rampa escorregamento.

Para trabalhos futuros do robô cobra propõe-se a reprodução da placa apresentada em (TA; UMEDACHI; KAWAHARA, 2018). A fabricação também é realizada por impressão 3D, mas necessita de um impressora de dois materiais. Para o material flexível recomenda-se a utilização do material TPU, polímero flexível e disponível no mercado para impressoras 3D na forma de filamentos, e PLA, material utilizado nos testes de atrito aqui apresentados.

5 Comunicação entre módulos

Um requisito importante para movimentação correta do robô, seguindo as equações descritas por Hirose (HIROSE; TONY, 1994) e também utilizado por Gomez (GÓMEZ, 2008) e Qiao (QIAO et al., 2017), é a coordenação entre módulos. Para realizar a movimentação, pode ser gerada uma tabela de valores que cada servo-motor deve seguir em cada instante de tempo. Essa tabela funciona com uma *lookup-table* na qual cada módulo possui uma lista de ângulos em sequência a ser seguida. Entretanto é importante que a leitura de cada valor na tabela esteja sincronizada. Sem isso, a diferença no *clock* de cada microcontrolador pode fazer com que o instante de tempo ao consultar a tabela seja diferente entre cada módulo, causando uma movimentação imprevisível e não planejada.

Para possibilitar a coordenação entre módulos, diversas tecnologias podem ser utilizadas. Cada tecnologia sem fio como *Wi-fi*, *Bluetooth* e rádio (todas utilizando radio-frequência em torno de 2,4GHz) apresentam vantagens e desafios. Além de precisarem de um elemento extra de *hardware*, necessitam também que o ambiente esteja livre de barreiras para funcionarem corretamente, mas possibilitam a comunicação individual com cada módulo robô.

Uma solução possível é realizar a comunicação de forma cabeada. O robô aqui proposto, em fase inicial de desenvolvimento, utiliza cabo, ocasionalmente chamado de “cordão umbilical” para sua alimentação. Os módulos serão conectados entre si por cabos que transmitirão uma mensagem. O protocolo escolhido foi o I²C, que utiliza uma composição mestre-escravo.

As informações sobre o protocolo I²C apresentadas a seguir foram obtidas a partir da documentação oficial presente no manual de usuário (NXP, 2021) e na apresentação da tecnologia (IRAZABAL; BLOZIS, 2003).

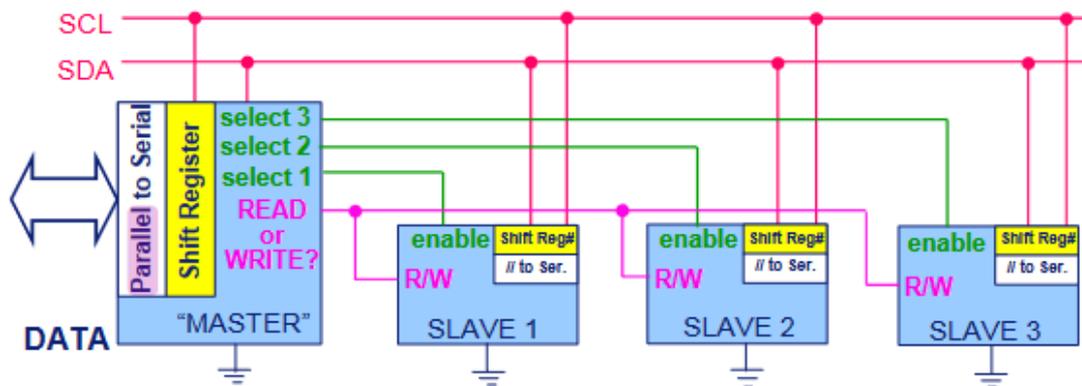
5.1 Breve descrição histórica

Com o avanço da computação, cada vez mais surgiram produtos com funções distintas, a princípio não relacionadas, com elementos comuns. Conversores A/D e D/A, sistemas inteligentes como microcontroladores, portas I/O, telas LCD e LED, CIs para leitura e processamento de sinais em outros. Todos esses elementos precisam ser controlados, mas conforme a complexidade do sistema aumenta, cresce também a dificuldade de comunicação com todos os elementos.

O conceito geral de comunicação serial considera que um elemento de *hardware* central, atuando como controlador (mestre), envia uma mensagem para um número pré-

determinado de receptores (escravo). Em um primeiro momento, pode-se pensar em utilizar bits seletores (de endereçamento) e bits que informam a leitura ou escrita no transmissor, como ilustrado na Figura 5.48.

Figura 5.48 – Conexão serial de 3 dispositivos. A conexão pode ser expandida infinitamente (atendendo limitações do barramento e de transmissão), mas para cada dispositivo escravo adicional é necessário aumentar a quantidade de saídas de seleção (*select*, em verde), além da conexão das outras entradas: R/W, SCL e SDA, o que aumenta rapidamente a complexidade do sistema.



Fonte: (IRAZABAL; BLOZIS, 2003)

Essa estratégia é mais simples em um primeiro momento, pois não requer muita atenção à codificação da mensagem ou multiplexação. Entretanto, com mais elementos, o *hardware* fica bastante complexo. Cada novo componente adiciona dois novos cabos, o que pode escalar rapidamente. Para solucionar esse problema foram desenvolvidas ao longo das décadas algumas tecnologias como: CAN, (até dois fios), USB (4 fios), SPI (4 fios), e I²C (2 fios).

A tecnologia I²C (Inter IC) foi desenvolvida pela Philips Semiconductors (atual NXP Semiconductors) no início da década de 80 para maximizar a eficiência de *hardware* e apresenta algumas vantagens: utiliza apenas dois fios, é bidirecional, possui endereçamento por *software*, permite a utilização de mais de um controlador no mesmo barramento; com detecção de colisão nas mensagens, possui modos de operação que variam de 100kbts/s até 5Mbits/s, e filtros que removem picos de tensão do barramento, garantindo certa proteção.

Além de todas as vantagens anteriores, I²C já é uma tecnologia consolidada. Dessa forma muitos produtos de *hardware* já são fabricados com essa tecnologia integrada, como microcontroladores. Entre eles o Arduino Pro Mini, sendo a tecnologia escolhida por esse motivo.

5.2 O protocolo

No protocolo I²C os dispositivos transmitem e recebem dados através de dois fios: serial data (SDA) e serial clock (SLK). O conjunto dos dois fios é chamado aqui de barramento. Cada dispositivo recebe um endereço único que independe de tipo. Na [Tabela 5.4](#) é possível observar a terminologia básica do protocolo.

Tabela 5.4 – Definição de terminologia

Termo	Descrição
Transmissor	Dispositivo que envia dados ao barramento
Receptor	Dispositivo que recebe dados do barramento
Controlador	Dispositivo que inicia a transferência, gera o clock, e termina a transferência
Destino	Dispositivo destino da solicitação do controlador
Multi-Controlador	Mais de um dispositivo pode tentar controlar o barramento, sem corromper a mensagem
Sincronização	Processo para assegurar que o clock de dois ou mais dispositivos está sincronizado
Arbitragem	Mecanismo que assegura que, em caso de “multi-controlador” apenas um efetivamente irá controlar o barramento e sua mensagem não será corrompida
Barramento	Conjunto dos cabos SDA e SLK

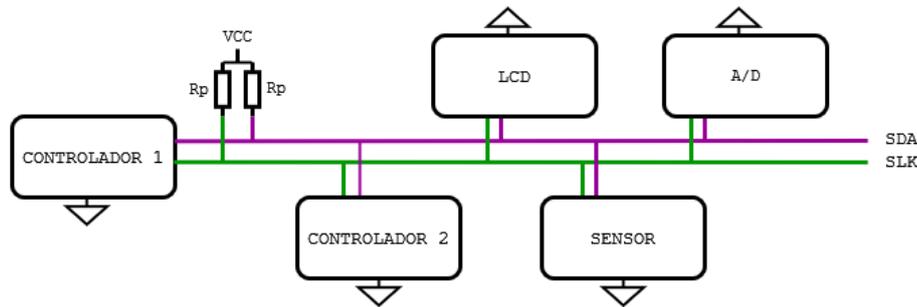
Fonte: (NXP, 2021)

Todos os dispositivos são conectados ao barramento e possuem sua referência (GND) conectada, o que pode ser visto na [Figura 5.49](#). O protocolo permite a presença de mais de um controlador, e para arbitrar quem terá acesso ao barramento é feita uma operação lógica AND cabeada entre o SLK dos controladores. Cada controlador inicia, controla o *clock* e termina a transmissão. Os controladores atuam tanto como transmissores quanto como receptores, a depender da requisição feita, podendo ler um sensor, ou escrever em um LCD, por exemplo.

Na [Figura 5.49](#) também é possível observar dois resistores que ligam tanto SLK quanto SDA ao VCC, que, de maneira geral, é de 5V para o protocolo. Quando não estão em uso, o modo normal de operação é o HIGH. Os valores das resistências são tipicamente utilizados entre 2kΩ e 10kΩ (IRAZABAL; BLOZIS, 2003), mas o valor pode ser calculado a partir de [Equação 5.1](#) e [Equação 5.2](#) (NXP, 2021).

$$R_{p(min)} = \frac{V_{DD} - V_{OL(max)}}{I_{OL}}; \quad (5.1)$$

Figura 5.49 – Exemplo de conexão de dispositivos I²C ao barramento



Fonte: Figura do autor

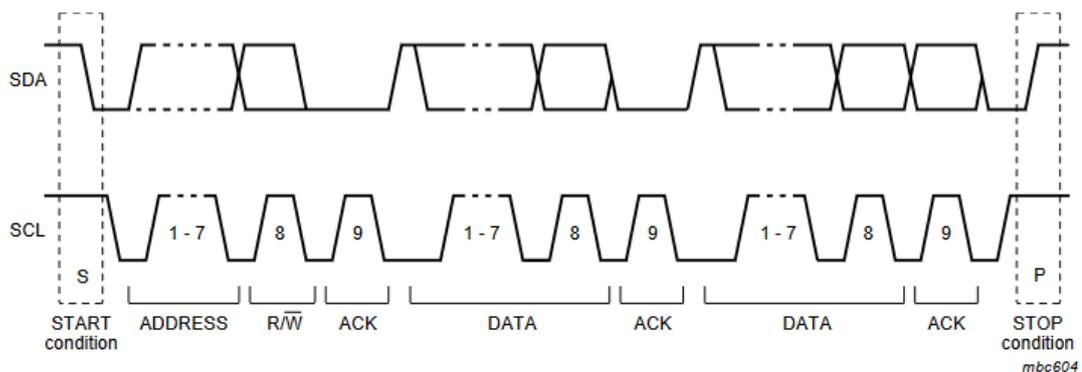
$$R_{p(max)} = \frac{t_r}{0,8473 \times C_r}; \quad (5.2)$$

onde o t_r é o tempo máximo de subida do sinal (1000ns) para modo padrão, C_b é a capacitância do meio (estimada), V_{OL} é a tensão para sinal lógico LOW (0,4V para tensões superiores a 2V), e I_{OL} é a corrente para sinal lógico LOW (3mA para modo de operação padrão).

A transferência de dados funciona como mostrado na Figura 5.50. Após uma condição inicial, que é controlada pelo controlador, um endereço de 7 bits é enviado. Após o endereço, é enviado um bit que representa se controlador deseja ler (zero, 0, LOW) ou escrever (um, 1, HIGH). Após esse bit, são enviadas ou recebidas as mensagens, conforme Figura 5.51. A transmissão sempre acaba quando ocorre uma condição de parada.

Caso o controlador deseje se comunicar com mais de um dispositivo, ao invés de realizar uma condição de parada, ele pode enviar uma condição inicial novamente ao barramento, e o processo se repete.

Figura 5.50 – Transferência de dados no barramento

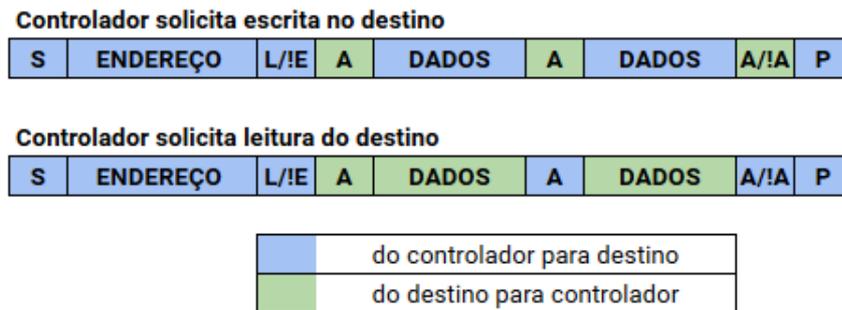


Fonte: (NXP, 2021)

Após o envio de 1 byte pelo transmissor (que pode ser tanto o controlador quanto um dispositivo subordinado), é enviado um bit de *acknowledgement* pelo receptor, que indica se

a mensagem foi recebida ou enviada corretamente. Caso esse bit falhe a transmissão pode fechar ou repetir, a depender da aplicação.

Figura 5.51 – Formato das mensagens enviadas. S: Condição inicial, L/E: Leitura/Escrita, A: ACK, P: Parada ou Início



Fonte: Adaptado de (NXP, 2021)

Como existe um acknowledgement a cada 8 bits (1 byte), toda mensagem maior do que isso precisa ser dividida. Por exemplo, um inteiro, de 4 bytes, precisa ser dividido em 4 partes para o envio, o que deve estar claro tanto no transmissor quanto no receptor.

Além do endereçamento de 7 bits, pode ser realizado um endereçamento de 10 bits. Entretanto, a regra de ser necessário um bit de acknowledgment a cada byte continua. Assim, quando é necessário utilizar um endereço de 10 bits, é necessário dividi-lo, como é feito com outros tipos de dados. De maneira similar ao modo de 7 bits, inicialmente são enviados 7 bits (sendo os 5 primeiros reservados e 2 seguintes do endereço) + 1 bit de leitura ou escrita. Após ser recebido o ACK, envia-se os 3 bits restantes do endereço e o funcionamento continua da mesma maneira que a anterior.

Para não ocorrer conflitos, alguns endereços são reservados, sendo usados para endereçamento de 10 bits, condição inicial, diferentes formatos e uso futuro. Dos 128 possíveis endereços (7 bits), tem-se 107 livres para uso, o que é mais que o suficiente para a maioria das aplicações.

5.3 Código da cabeça

Como o I²C é um protocolo consolidado, o Arduino já possui uma biblioteca que possibilita o uso desse tipo de protocolo, a biblioteca `Wire.h`, como em [Código 5.1](#):

Código 5.1 – Inclusão da biblioteca Wire

```
#include <Wire.h>
```

Na função *setup*, é necessário inicializar a conexão com `Wire.begin()`, como em [Código 5.2](#)). Aqui não é passado argumento para a função, indicando que este é o controlador do barramento.

Código 5.2 – Inicialização do protocolo I²C no módulo controlador

```
Wire.begin();
```

Por fim, na função *loop*, é realizada a transmissão dos dados. Inicia-se a transmissão, com `Wire.beginTransmission(module)`, sendo *module* o endereço do receptor. Depois é enviado o dado com `Wire.write(value)`, e a transmissão é encerrada com `Wire.endTransmission()`, como apresentado em [Código 5.3](#). Toda a transmissão segue a estrutura vista em [Figura 5.51](#).

Neste caso, a cabeça tem papel de coordenar (sincronizar) os módulos, fazendo com que sigam a tabela de ângulos no mesmo ritmo. Caso dois módulos (vértebras) percam a sincronia cada módulo seguirá um índice diferente na sua tabela, o que pode resultar em um movimento imprevisível.

Como só é necessário um bit para coordenar essa movimentação, não é necessário gastar energia e tempo com mensagens maiores, tanto ao dividir o dado em grupos de 8 bits, quanto enviando esses grupos. Logo, é enviado apenas 1 byte.

Código 5.3 – Abertura da transmissão, envio de dado e fechamento da transmissão

```
Wire.beginTransmission(module);  
Wire.write(value);  
Wire.endTransmission();
```

5.4 Código da vértebra

As vértebras, aqui atuando apenas como receptores no protocolo I²C, possuem algumas diferenças na sua implementação. A primeira diferença é que é necessário definir o endereço do dispositivo, o que é feito passando este valor para a função `Wire.begin(endereço)`, como em [Código 5.4](#). Os 7 primeiros endereços são reservados, logo o primeiro disponível é o endereço 8. Apesar da reserva, em sistemas mais simples, que não irão utilizar esses endereços, é possível utilizá-los. Porém, perde-se confiabilidade, o que foi constatado em testes experimentais.

Código 5.4 – Inicialização dos módulos de vértebras (receptores)

```
Wire.begin(MODULE_NUMBER);  
Wire.onReceive(receiveEvent);
```

O módulo do corpo espera a condição inicial de transmissão. Quando a recebe ocorre uma interrupção e a função `receiveEvent` é chamada. Como o valor enviado não é utilizado, é necessário limpar o *buffer* do barramento, pois sem isso ocorrem colisões de dados e o destino não consegue responder. As funções que são executadas ao ocorrerem interrupções e que realizam a descarga de dados, respectivamente, podem ser vistas no [Código 5.5](#) e [Código 5.6](#).

Código 5.5 – Função realizada no módulo após interrupção

```
void receiveEvent (int howMany) {
    flush_wire();
    motor.write(angle[index])
    index++;
    if(index>=tamanho_lista){
        index=0;
    }
}
```

Código 5.6 – Descarga dos bits no barramento

```
void flush_wire() {
    while(Wire.available()) {
        Wire.read();
    }
}
```

Cada módulo possui também sua própria tabela de ângulos a ser seguidos, definidos temporalmente a partir da [Equação 2.3](#), definida por (GÓMEZ, 2008). Essa tabela de valores pode ser visto em [Código 5.7](#).

Código 5.7 – Lista (tabela) de ângulos

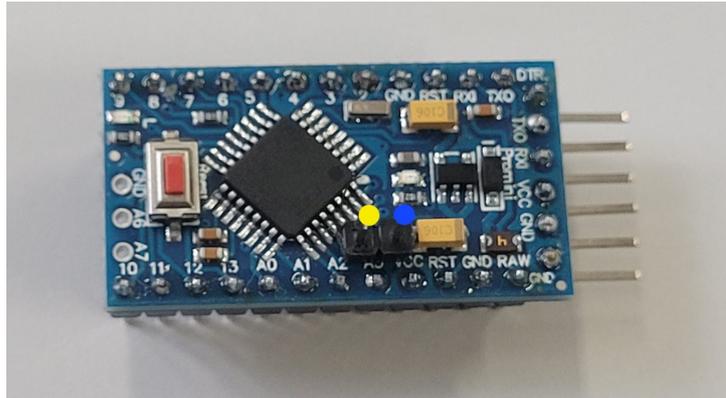
```
int angle[13] = {0, 90, 180, 90, 45, 30, 20, 11, 120, 180,
    150, 49, 30};
const int tamanho_lista = 13;
```

Os códigos completos desenvolvidos para uma versão inicial do robô, pensando em uma movimentação definida previamente, como uma lista de valores (ângulos) obtidas com base nas equações de (HIROSE; TONY, 1994) podem ser vistos no [Apêndice A](#).

5.5 Camada física

O microcontrolador selecionado para o projeto foi o Arduino Pro Mini, tendo versões de 3,3V (8MHz) e 5V (16MHz). A versão utilizada na etapa experimental foi de 5V. Uma placa desse modelo pode ser vista na [Figura 5.52](#).

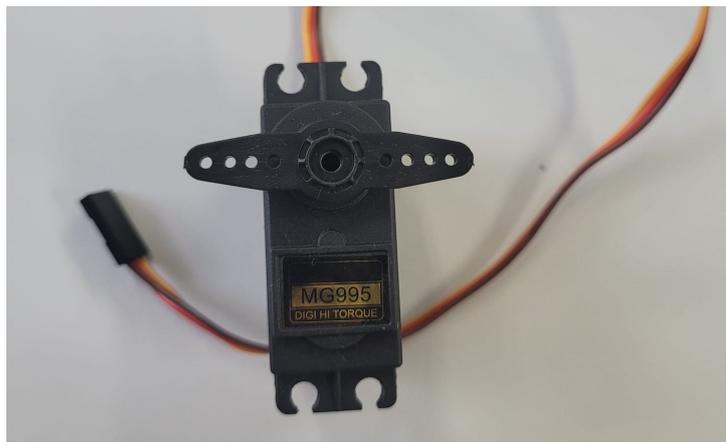
Figura 5.52 – Arduino Pro Mini



Fonte: Figura do autor

No Arduino Pro-Mini a porta A4 (em amarelo) é a porta utilizada para SDA e a porta A5 (em azul) para SLK.

O atuador escolhido foi o Servo Motor MG995, que atua entre 4,8V e 6V, e pode ser visto na [Figura 5.53](#). Esse motor possui 180° de rotação controlável. Quando parado, o consumo de corrente é muito baixo, mas em movimentos rápidos e com carga, a corrente de pico pode chegar a 1A, o que pode danificar um microcontrolador que o esteja controlando, logo é necessária um fonte externa de energia, com o GND conectado ao do microcontrolador.



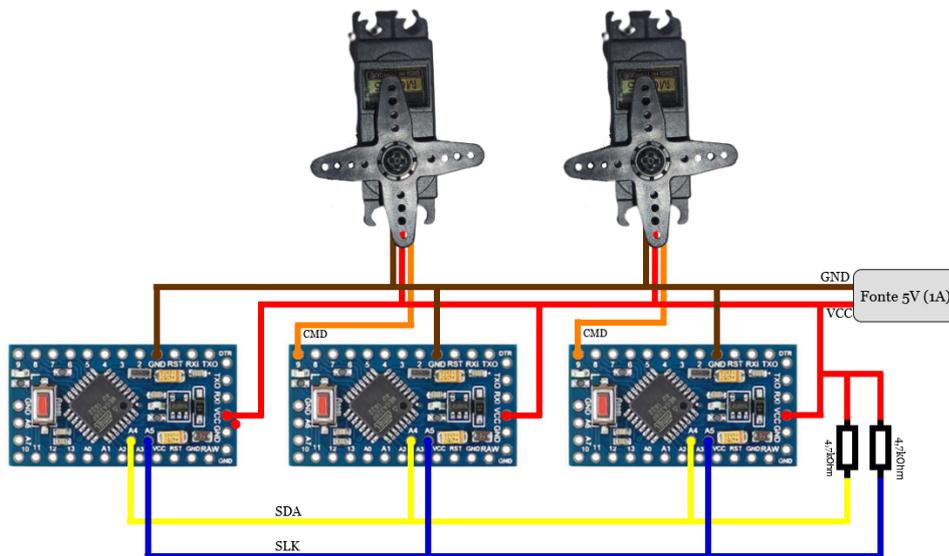
Fonte: Figura do autor

Figura 5.53 – Servo Motor MG995

Apesar dos valores das resistências de *pull-up* poderem ser calculadas a partir de [Equação 5.1](#) e [Equação 5.2](#), seus termos são difíceis de estimar, e seu resultado é mais voltado

a fabricantes de PCI e outros sistemas. Usando (ZAMBETTI, 2023) como base, guia oficial de I²C para Arduino, optou-se por utilizar resistores de 4,7k Ω .

Figura 5.54 – Montagem do circuito. A legenda de cores segue: vermelho - VCC, marrom - GND, amarelo - SDA, azul - SLK, laranja - comando. O primeiro Arduino (esquerda) é quem envia o comando. Para a direita é possível expandir o número de módulos repetindo as conexões de Arduino, motor e I2C.



Fonte: Figura do autor

Um esquemático da conexão dos Arduinos Pro Mini com os seus respectivos motores, e com o barramento I²C é visto na Figura 5.54. A alimentação dos Arduinos é feita através das postas VCC e GND na placa, visto na Figura 5.52). A porta escolhida arbitrariamente para controlar a posição do motor, em graus, foi a porta digital 9. Todas as portas SDA são conectadas entre si, e o mesmo ocorre com as portas SLK. Os motores são alimentados por uma fonte não mostrada na figura, que tem seu terra conectado ao terra dos Arduinos.

O funcionamento ocorreu como esperado. Os motores realizaram o movimento seguindo sua tabela de ângulo, com o tempo entre movimentos controlado pela cabeça.

Para o robô final, a ser realizado em trabalhos futuros, é necessário conectar todos os módulos por três fios, os dois do protocolo I²C e um para o compartilhamento do terra. Caso os micro-controladores não possuam a mesma referência o protocolo não funcionará corretamente.

6 Conclusões

Serpentes são animais fascinantes. Apenas de não possuírem membros, possuem diversos tipos de movimentação que utilizam em diferentes ambientes, o que permitiu que esses animais prosperassem desde florestas tropicais até desertos arenosos. Elas conseguem ativamente controlar suas escamas e assim controlar seu atrito com o ambiente, possibilitando sua movimentação.

A reprodução desse controle refinado que esses animais possuem sobre o atrito de seus corpos não é simples. A estrutura das escamas é muito pequena e complexa para ser reproduzida de forma viável e eficiente pela engenharia, o que leva a necessidade de buscar outras alternativas para solucionar este problema.

A diferença na estrutura dos diferentes tipos de escamas, além da sua disposição gera uma anisotropia do animal com o solo. Foi observado neste trabalho que essa característica é fundamental para possibilitar a movimentação dos robôs modulares bioinspirados.

O trabalho possuiu três objetivos específicos. O primeiro foi o desenvolvimento de protótipo de módulo baseado no proposto por Galembeck (GALEMBECK, 2018). O segundo foi a análise sobre a anisotropia do atrito, com a utilização de diferentes placas. O último objetivo foi a implementação da comunicação entre módulos.

Com a fabricação do módulo proposto por Galembeck foi possível visualizar pontos que necessitaram ser alterados, sendo eles : a fixação da tampa do módulo no seu corpo, a fixação da placa de atrito no corpo e algumas dimensões para encaixes. Com as alterações feitas em *software* CAD o módulo foi fabricado e testado, apresentando maior resistência que o modelo anterior.

Para verificar a hipótese considerada de reproduzir a anisotropia do atrito no módulo proposto através do uso de placas com diferentes geometrias de contato, foi necessário realizar a prototipagem do módulo e a realização de testes de atrito. Os testes realizados mostraram que não é possível construir uma estrutura rígida e sem partes móveis que seja capaz de apresentar uma anisotropia suficiente para o movimento. Uma alternativa (excluindo o uso de rodas ou esteiras) é a utilização de elementos flexíveis que, ao serem movimentados, alteram o material que está em contato com o solo, assim criando uma anisotropia.

Um ponto importante que poucas vezes é explorado em outros trabalhos é como a informação será transmitida entre os módulos. Uma solução possível, mas que foi descartada, é a utilização de formas de comunicação sem fio, como rádio frequência, com cada módulo individual. No estágio atual do projeto, cada módulo deve seguir uma lista de valores para a angulação de seu servo motor, sendo necessário apenas a sincronia entre cada microcontro-

lador, o que pode ser facilmente obtida de maneira cabeada, utilizando o protocolo I²C. O protocolo foi implementado e testado, em uma escala menor, com três módulos, e funcionou corretamente. Acredita-se que essa forma de comunicação atenderá aos requisitos do robô, e poderá ser facilmente escalado para um número maior de módulos.

Por fim, conclui-se que foram alcançados dois resultados importantes. O primeiro diz respeito ao atrito do módulo: não foi possível reproduzir uma anisotropia satisfatória no atrito utilizando peças rígidas com os materiais e técnicas utilizadas. O segundo diz respeito a comunicação: é possível utilizar comunicação cabeada entre os módulos para alcançar a sincronia desejada. Caso seja necessário enviar comandos diferentes dos listados na tabela de ângulos, apenas um módulo, a cabeça, precisa reter toda a informação necessária para todos os módulos e pode transmitir para o resto do corpo, diminuindo a complexidade de cada módulo.

6.1 Trabalhos futuros

A comunicação proposta não foi validada com um robô completo. É necessário realizar testes que considerem um número maior de módulos e analisar também a necessidade de elementos adicionais de *hardware*, pois o protocolo I²C não foi projetado para longas distâncias que, a depender de como o barramento é feito, pode ter cerca de 1m de comprimento. A alimentação dos módulos também é uma questão que deve ser revista, sendo esta feita por fonte externa (cordão umbilical) ou com bateria interna. Em ambos os casos é necessário projetar e fabricar uma PCI para dar suporte a todos os elementos de *hardware* e evitar falhas por mal contato. Também é necessário fabricar, em uma impressora 3D com pelo menos dois extrusores, uma placa de atrito baseada em (TA; UMEDACHI; KAWAHARA, 2018). Após a fabricação, são necessários testes para validar a aplicação. Por fim é necessário construir um robô com um número considerável de módulos e validar o funcionamento de todas as partes propostas de forma conjunta.

Referências

- BAUM, M. J.; KOVALEV, A. E.; MICHELS, J.; GORB, S. N. Anisotropic Friction of the Ventral Scales in the Snake *Lampropeltis getula californica*. **Springer Science**, v. 54, p. 139–150, mar. 2014. DOI: [10.1007/s11249-014-0319-y](https://doi.org/10.1007/s11249-014-0319-y). Citado nas pp. 13, 21, 32.
- BENHABIB, B.; DAI, M. Mechanical design of a modular robot for industrial applications. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 10, n. 4, p. 297–306, 1991. ISSN 0278-6125. DOI: [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(91\)90024-V](https://doi.org/10.1016/0278-6125(91)90024-V). Citado na p. 21.
- BENYUS, J. M. **Biomimicry: innovation inspired by nature**. Rio de Janeiro: Harper Perennial, 1997. Citado na p. 16.
- BORENSTEIN, J.; HANSEN, M.; BORRELL, A. The OmniTread OT-4 Serpentine Robot—Design and Performance. **Journal of Field Robotics**, v. 24, n. 7, 2006. Citado nas pp. 13, 28, 29.
- BRUNETE, A.; HERNANDO, M.; GAMBAO, E.; TORRES, J. A behaviour-based control architecture for heterogeneous modular, multi-configurable, chained micro-robots. **Robotics and autonomous systems**, Elsevier B.V, v. 60, n. 12, p. 1607–1624, 2012. ISSN 0921-8890. Citado nas pp. 13, 21, 29.
- DEGOND, P.; DIEZ, A.; NA, M. **Bulk topological states in a new collective dynamics model**. Jan. 2021. Citado na p. 23.
- GALEMBECK, T. F. **Processo para medição e avaliação de atrito com fins de facilitar movimentação de robô ápole**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/24285>. Citado nas pp. 13, 14, 30–34, 43, 61.
- GILPIN, K.; RUS, D. Modular Robot Systems. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, v. 17, n. 3, p. 38–55, 2010. ISSN 1070-9932. Citado na p. 22.
- GOMES, V. C. **Simulação do atrito anisotrópico para movimentação de robô ápole bio-inspirado**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília, Brasília. Citado nas pp. 26, 27, 31, 32, 40, 49.
- GÓMEZ, J. G. **MODULAR ROBOTICS AND LOCOMOTION: APPLICATION TO LIMBLESS ROBOTS**. 2008. Tese de Doutorado – Universidad Autonoma de Madrid, Madrid. Citado nas pp. 13, 14, 24–26, 52, 58.

- GONZALEZ-GOMEZ, J.; GONZALEZ-QUIJANO, J.; ZHANG, H.; ABDERRAHIM, M. “Toward the sense of touch in snake modular robots for search and rescue operations,” **Proc. ICRA 2010 Workshop on Modular Robots: State of the Art**, jan. 2010. Citado na p. 13.
- GUIMARÃES, P.; NUNES, M.; GALEMBECK, T.; KALEJAIYE, L.; TENÓRIO, R.; KOIKE, C.; VIANA, D.; VIDAL, F. A bio-inspired apodal and modular robot. **XIII Latin American Robotics Symposium and IV Brazilian Robotics Symposium**, 2016. DOI: [10.1109/LARS-SBR.2016.17](https://doi.org/10.1109/LARS-SBR.2016.17). Citado nas pp. 30, 31.
- HIROSE, S.; TONY, O. Biologically Inspired Robots: Snake-Like Locomotors and Manipulators by Shigeo Hirose. **Robotica**, Cambridge University Press, p. 282–282, 1994. DOI: [10.1017/S0263574700017264](https://doi.org/10.1017/S0263574700017264). Citado nas pp. 14, 23, 52, 58.
- HIROSE, S.; YAMADA, H. Snake-Like Robots Machine Design of Biologically Inspired Robots. **IEEE robotics and automation magazine**, IEEE, v. 16, n. 1, p. 88–98, 2009. ISSN 1070-9932. Citado nas pp. 13, 27.
- IRAZABAL, J.-M.; BLOZIS, S. **AN10216-01 I2C Manual**. English. 24 mar. 2003. Citado nas pp. 52–54.
- LILJEBÄCK, P. **Modelling, Development, and Control of Snake Robots**. 2011. Tese de Doutorado – NTNU - Norwegian University of Science e Technology, Trondheim. Citado nas pp. 13, 18, 19, 27, 28.
- MARVI, H.; COOK, J.; STREATOR, J.; HU, D. Snakes move their scales to increase friction. **Biotribology**, v. 5, nov. 2015. DOI: [10.1016/j.biotri.2015.11.001](https://doi.org/10.1016/j.biotri.2015.11.001). Citado nas pp. 13, 18, 50.
- NANDAN, R.; DEBROY, T.; BHADSHIA, H. Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties. **Progress in materials science**, Elsevier Ltd, v. 53, n. 6, p. 980–1023, 2008. ISSN 0079-6425. Citado na p. 39.
- NXP. **UM10204 - I2C-bus specification and user manual**. English. 1 out. 2021. Citado nas pp. 52, 54–56.
- QIAO, G.; WEN, X.; LIN, J.; WANG, D.; WEI, Z. Sigmoid transition approach of the central pattern generator-based controller for the snake-like robot, 2017. DOI: [10.1177/1729881417705289](https://doi.org/10.1177/1729881417705289). Citado nas pp. 13, 14, 24, 25, 52.
- REDMAN, C. **Fun Facts about Bats!** Out. 2021. Disponível em: <https://www.grpm.org/blog/fun-facts-about-bats/>. Acesso em: 26 jun. 2023. Citado na p. 16.
- ROSCITO, J. G.; SAMEITH, K.; PARRA, G.; LANGER, B. E.; PETZOLD, A.; MOEBIUS, C.; BICKLE, M.; RODRIGUES, M. T.; HILLER, M. Phenotype loss is associated with widespread divergence of the gene regulatory landscape in evolution. **NATURE COMMUNICATIONS**, NATURE COMMUNICATIONS, 2018. Citado na p. 17.

- SOCHA, J. Kinematics - Gliding flight in the paradise tree snake. **Nature**, v. 418, p. 603–4, set. 2002. DOI: [10.1038/418603a](https://doi.org/10.1038/418603a). Citado nas pp. 13, 19.
- SOUSA, A.; CALDAS, R.; KOIKE, C.; VIANA, D. EREKOBOT SIGMA: PROTÓTIPO DE UM ROBÔ MODULAR RECONFIGURÁVEL COM SENSORES. **ABCM Symposium Series in Mechatronic**, v. 6, out. 2014. Citado na p. 30.
- SOUSA, A. C. C. de. **Comunicação de dados e protocolos em robôs modulares auto-reconfiguráveis**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/15312>. Citado nas pp. 30, 31.
- SOUZA, N.; DUTRA, R.; BRITO, L.; KOIKE, C.; VIANA, D. PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ MODULAR. **VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**, v. 4, out. 2010. Citado nas pp. 13, 30.
- SOUZA, N.; FELIPPES, R.; MILZARA, S.; GUIMARÃES, P.; KOIKE, C.; VIANA, D.; OLIVEIRA, L.; FRANCO, D. EREKOBOT ALFA PROJECT: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A MODULAR ROBOT PROTOTYPE. **ABCM Symposium Series in Mechatronics**, v. 5, 2012. Citado nas pp. 30, 31.
- TA, T. D.; UMEDACHI, T.; KAWAHARA, Y. Design of Frictional 2D-Anisotropy Surface for Wriggle Locomotion of Printable Soft-Bodied Robots, p. 6779–6785, 2018. DOI: [10.1109/ICRA.2018.8463177](https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8463177). Citado nas pp. 50, 51, 62.
- VELCRO Brand. 2023. Our Timeline of Innovation. Disponível em: <https://www.velcro.com/original-thinking/our-timeline-of-innovation/>. Acesso em: 26 jun. 2023. Citado nas pp. 13, 16.
- VINCI, L. da. **Projeto de asas inspirado em morcego**. 1490. Citado na p. 16.
- WEST, J. **Ask Nature**. High Speed Train Inspired by the Kingfisher. Disponível em: <https://asknature.org/innovation/high-speed-train-inspired-by-the-kingfisher/>. Acesso em: 26 jun. 2023. Citado nas pp. 13, 17.
- WRIGHT, C.; BUCHAN, A.; BROWN, B.; GEIST, J.; SCHWERIN, M.; ROLLINSON, D.; TESCH, M.; CHOSET, H. Design and architecture of the unified modular snake robot. In: 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2012. P. 4347–4354. ISBN 9781467314039. Citado na p. 29.
- YAMADA, H.; HIROSE, S. Development of Practical 3-Dimensional Active Cord Mechanism ACM-R4. **Journal of Robotics and Mechatronics**, v. 18, n. 3, 2006. DOI: [10.20965/jrm.2006.p0305](https://doi.org/10.20965/jrm.2006.p0305). Citado na p. 28.
- ZAMBETTI, N. **A Guide to Arduino and the I2C Protocol (Two Wire)**. 2023. Wiki do Arduino. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/learn/communication/wire>. Acesso em: 20 jun. 2023. Citado na p. 60.

Apêndices

Apêndice A – Códigos de programação

A.1 Código da cabeça do robô (controlador)

Código A.1 – Código Cabeça

```
1 #define TIME_DELAY 1000
2
3 #include <Wire.h>
4 byte value;
5 void setup() {
6     Wire.begin();
7     value=1;
8 }
9
10 void loop() {
11     //Aqui defini-se com exemplo um robo de 11 modulos
12     for(int module = 10; module <= 20; module++){
13         Wire.beginTransmission(module);
14         Wire.write(value);
15         Wire.endTransmission();
16     }
17     delay(TIME_DELAY);
18 }
```

A.2 Código da vértebra do robô (receptores)

Código A.2 – Código Cabeça

```
1 #define MODULE_NUMBER 11
2 #define PIN_MOTOR 9
3 #include <Wire.h>
4 #include <Servo.h>
5
6 int angle[6] = {0, 10, 180, 75, 35, 98};
7 const int tamanho_lista = 6;
8 Servo motor;
9 int index;
10
11 void setup() {
12     Wire.begin(MODULE_NUMBER);
13     Wire.onReceive(receiveEvent);
14     motor.attach(PIN_MOTOR);
15     index=0;
16 }
17 void loop() {
18     delay(10);
19 }
20
21 void receiveEvent(int howMany) {
22     flush_wire();
23     motor.write(angle[index]);
24     index++;
25     if (index >= tamanho_lista){
26         index=0;
27     }
28 }
29 void flush_wire(){
30     while(Wire.available()){
31         Wire.read();
32     }
33 }
```