

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**PROCESSO PARA MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO
DE ATRITO COM FINS DE FACILITAR
MOVIMENTAÇÃO DE ROBÔ ÁPODE**

Por,

Thaís França Galembeck

Brasília, 5 de dezembro de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

PROCESSO PARA MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO DE ATRITO COM FINS DE FACILITAR MOVIMENTAÇÃO DE ROBÔ ÁPODE

Por,

Thaís França Galembeck

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico

Banca Examinadora

Prof. Dianne Magalhães Viana (Orientadora) _____

Prof. Adriano Todorovic Fabro _____

Prof. Carla Maria Koike _____

Brasília 5 de dezembro de 2018

Resumo

Todos os seres vivos são resultados de um processo de validação e otimização de, no mínimo, milhares de anos, período de testes superior à quaisquer teorias ou mecanismos desenvolvidos por seres humanos. Por isso, o uso de tecnologias bioinspiradas é algo até óbvio, principalmente em situações onde animais tem desempenho melhor do que máquinas tradicionais, como busca e salvamento de sobreviventes em destroços. Em verdade, já existe na literatura uma série de projetos de robôs bioinspirados em cobras, os quais buscam fazer uso do estilo de locomoção de fácil equilíbrio do animal e sua adaptabilidade a diversos terrenos.

Contudo, a existência de tais projetos não significa nem sua aplicação prática de maneira satisfatória nem o melhor uso das possibilidades que estes trazem, o que se explica em parte pelo fato de muitos dos robôs presentes na literatura sofrem do mesmo mal: a falta do estudo adequado sobre os efeitos do atrito na movimentação e de como o tornar útil. Uma falha que poderia ser perdoada em vários projetos que não exijam precisão fina de deslocamento, mas que traz perdas de informação e otimização enquanto considerados robôs inspirados em cobras. Nada na natureza é por acaso, e se estes animais possuem acabamentos superficiais nanométricos em suas escamas ventrais diferentes dos observados em suas escamas dorsais, os quais alteram o coeficiente de atrito em três direções das escamas, há uma razão por trás.

E é por essa lógica que o principal objetivo deste trabalho não foi desenvolver soluções inovadoras para melhorar a movimentação dos ditos robôs cobra, mas sim buscar respostas simples que tenham ficado pra trás durante a evolução destes. Como por exemplo, a explicação lógica e física do porquê as cobras enrolam seus corpos enquanto de movem e como esse fenômeno pode ser aplicado. Em suma, para se seguir adiante em robôs cobra com aplicação melhor e mais ampla, esse trabalho propõe olhar para trás, para o começo.

Foram selecionadas três frentes de desenvolvimento: geometria e morfologia do robô, desenho e teste de escamas artificiais e determinação de uma rotina baseada em relações trigonométricas através da qual um robô seja capaz de obter um senso quanto ao atrito do terreno onde se encontre.

Todas as três etapas pediram por um estudo morfológico e físico de robótica modular, movimentação cobra, anatomia e comportamento de cobras além de definições quanto

ao fenômeno de atrito e seus modelos. Com isso, a presença de uma extensa revisão bibliográfica em diferentes conteúdos foi inevitável, porém os resultados foram mais que satisfatórios, enquanto compostos por uma validação quanto a aplicabilidade de soluções simples bioinspiradas, as quais podem ser aplicadas à quaisquer robôs com movimentação cobra.

Palavras-chaves: atrito; robô cobra; robô modular

Abstract

All living beings are the result of a validation and optimization process of at least thousands of years, to superior test period than any mechanism or theory developed by humans. Therefore, the use of bioinspired technologies is obvious, especially in conditions where animals have better performance than traditional machinery, such as search and rescue of survivors in accident debris. In fact, the already exist to sieres of projects the snake inspired robots in literature, whose made use of the stable locomotion gait of the animal and it's adaptability to unknow terrain.

However, the existence of such project does not translate into it's optimal applica-tion nor in the better use of it's inehenrent possibilities, what can be explained in part by tha fact that most of the robots found in the literature commit the same sin: the lack of a proper study about friction effects on locomotion and how to make it valuable. A mis-take that could be forgiven in most projects that do not call for fine movement precision, but that causes loss of information and optimization while considering snake bioinspired robots. Nothing is done in nature without a reason, and if those animals have nanomet-ric superficial characteristics in it's ventral scales that are different from it's dorsal ones, and if those characteristics alter the scale friction coefficente in three different directions, there is a reason behind it.

And this is why the main objective of this work was not to develop a brand new solution to optimize the locomotion of so said robots, but rather look for simple answers that have been left behing during the robots evolution. For example, the logical and physical reason for why they snake wrap their bodies during it's movement and how this phenomenon can be applied. In short, to move ahead with snake robots with a better and wider application, this work proposes to look back, to the starter point.

Three development fronts where selected: geometry and morphology of the robot, design and test of artificial scales and determination of the routine based on trigonometric relations such that it allows the robot to get a sense of the it's terrain friction.

All three fronts required a morphological and physic studie of modular robotics, snake locomotion, snake anatomy and behavior as well as definitions of the friction phe-nomena and it's models. With that, the presence of an extense literature review was inescapable, but the results here are more satisfactory, while presentis to validation of the applicability of simple bioispres solutions that can be applied in any robot with snake

locomotion.

Key-words: friction, snake robot, modular robot

Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplo de aplicação de biomimética na indústria: WhalePower	7
Figura 2 – Esqueleto de Cobra, demonstrando as vértebras e a estrutura da espinha	9
Figura 3 – Movimentos realizados por cobras	10
Figura 4 – Diferenciação simples entre Módulo e Robô	12
Figura 5 – Simplificação de movimentos pitch e yaw	14
Figura 6 – Dois diferentes tipos de orientação de roda em relação a um módulo	15
Figura 7 – Módulos do M-Tran	17
Figura 8 – Robô modular ápole com quatro morfologias diferentes	17
Figura 9 – Evolução Módulos Série Ereko	18
Figura 10 – Representação de robô em modelagem	20
Figura 11 – Representação de grau de liberdade nos atuadores	21
Figura 12 – Representação dos ângulos de bloco e de junta	22
Figura 13 – Diferentes formas de curva com diferentes fatores k	23
Figura 14 – Esquematisação de deslocamento usando movimentação pitch-pitch	25
Figura 15 – Esquematisação de deslocamento usando movimentação yaw-yaw	26
Figura 16 – Exemplo de corpo em plano inclinado	28
Figura 17 – Exemplo de diferentes escamas em uma cobra	35
Figura 18 – Superfície anisotrópica com direções Vertical e Horizontal heterogêneas	36
Figura 19 – Exemplo numérico de Dahl	41
Figura 20 – Exemplo numérico do modelo de Cerdas sem correção	44
Figura 21 – Exemplo numérico do modelo de Cerdas com correção	45
Figura 22 – Exemplo numérico do modelo de Cerdas com deslocamento periódico	46
Figura 23 – Exemplo numérico do modelo de Dahl usando movimentação não-periódica	47
Figura 24 – Exemplo numérico do modelo de LuGre usando movimentação periódica	53
Figura 25 – Diagrama de um sistema SEA	61
Figura 26 – Alteração de posição relativa durante movimento	68
Figura 27 – Dois pontos de referência para tomada de distância	71
Figura 28 – Transmissão de força devido à junta	71
Figura 29 – Três possíveis configurações de início para rotina de calibragem	72
Figura 30 – Curvas representando os três tipos de posições de pré-calibragem	75

Figura 31 – Curvas no espaço e seus centros de massa	76
Figura 32 – Comparação entre duas curvas com ângulos de atuação máximos diferentes	79
Figura 33 – Estrutura do Módulo Sigma-Lily	79
Figura 34 – Módulos Sigma-Lily conectados	80
Figura 35 – Simplificação do robô com módulos NEKE	80
Figura 36 – Protótipo de seção transversal hexagonal	81
Figura 37 – Os três estilos de Módulos VDM propostos	81
Figura 38 – Robô de composição Homogênea com VDM-Y	82
Figura 39 – Robô de composição Heterogênea com VDM-Y e VDM-T	82
Figura 40 – Composição Do Módulo VDM	83
Figura 41 – Exemplo de 5 placas com diferentes relações entre aspectos e níveis	86
Figura 42 – Exemplificação de estruturas utilizadas para reprodução de anisotropia	87
Figura 43 – Nomenclatura das três partes que compõem a superfície de atrito discutida	87
Figura 44 – Cubo formado pelos três aspectos I selecionados com dois Níveis B	89
Figura 45 – Comparação visual entre placas de máxima e mínima densidade	90
Figura 46 – Placa $A0_1$ nos três sentidos usados para avaliação de anisotropia	91
Figura 47 – Placas $Alpha0$, idênticas senão pelos ressaltos laterais	92
Figura 48 – Exemplo do conjunto formado por placa acoplada ao bloco de madeira	94
Figura 49 – Descontinuidade no escorregamento do conjunto bloco-placa	95
Figura 50 – As quatro placas da série Alpha utilizadas em testes	97
Figura 51 – Diferença nas dimensões das cerdas em acordo com ângulo de acabamento superficial	98
Figura 52 – Design conceitual da série Beta	103
Figura 53 – Os três passos da rotina de calibragem	105
Figura 54 – Resultados Numéricos Dahl	109
Figura 55 – Resultados Numéricos Cerdas	110
Figura 56 – Resultados Numéricos LuGre	111

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Movimentação Cobra	10
Tabela 2 – Movimentação Robô Cobra	14
Tabela 3 – Descrição das entradas, saídas e parâmetros de quatro modelos de atrito	56
Tabela 4 – Etapas envolvidas no processo de calibragem	67
Tabela 5 – Análise sobre ângulos de atuação para três módulos sequenciais quanto à calibragem tendo por referência os modelos VDM apresentados na Seção 8.2	69
Tabela 6 – Possibilidades de configuração inicial assumida pelo robô	73
Tabela 7 – Comparação entre coordenadas e distâncias dos centros de massa para os três casos iniciais considerando módulos VDM	74
Tabela 8 – Especificações básicas de impressoras 3D consideradas conforme dados apresentados nos sites de seus respectivos fabricantes, visitados em 2018	88
Tabela 9 – Aspectos e níveis considerados para Série Alpha	88
Tabela 10 – Resultados para distância de parada com A0-1 e A0-0	93
Tabela 11 – Resultados obtidos com escorregamento em plano inclinado para série A0 acoplada à um bloco de madeira	95
Tabela 12 – Comparação de performance em plano inclinado do modelo A0 ₁ entre superfícies com e sem escamas	96
Tabela 13 – Comparação de volume entre as quatro placas Alpha1 impressas para testes	98
Tabela 14 – Análise de anisotropia em dois sentidos para dois ângulos de inclinação usando série A1	99
Tabela 15 – Comparação entre velocidades médias no plano inclinado da série A1 .	100
Tabela 16 – Comparação percentual entre velocidade obtidas placa à placa	101
Tabela 17 – Relação numérica entre ângulo teórico de calibragem, distância real medida e atrito	106

Lista de abreviaturas e siglas

l	Comprimento total de um módulo
N	Número total de módulos em um robô
α	Ângulo de atuação de um bloco de módulos
$\tilde{\alpha}$	Orientação do robô cobra no espaço
$M(x,y,z)$	Coordenada teórica do centro de massa de um módulo no espaço
F_s	Força de atrito estático
F_v	Força externa ou interna que causa o movimento relativo entre duas superfícies
F_c	Força de atrito obtida pelo modelo seco de Coulomb
F_d	Força de atrito obtida pelo modelo de Dahl
F_d	Força de atrito obtida pelo modelo de Cerdas
F_d	Força de atrito obtida pelo modelo de LuGre
$\bar{\theta}$	Ângulo médio de orientação da cobra
sgn	Função Sinal
z	Deflexão de uma estrutura
θ	Ângulo de inclinação de uma superfície em relação à horizontal
μ_v	Coefficiente de atrito dinâmico
F_a	Força de atrito
μ_e	Coefficiente de atrito estático
s_i	Posição relativa no tempo entre duas superfícies de contato
b_i	Posição de uma cerda qualquer
σ_d	Resistência à deformação da superfície de contato no modelo de Dahl

σ_b	Deflexão das cerdas
K e K_b	Constante de mola em cerdas nos modelos de Cerdas e RIM equivalentes
\dot{p}	Integrador usado no modelo RIM
δ_r	Raio de aparição de novos pontos de contato em Cerdas e RIM
σ_e	Deflexão de ruptura no modelo das cerdas
σ_0	Resistência ao deslocamento das cerdas no modelo de LuGre
σ_1	Amortecimento das cerdas no modelo de no modelo de LuGre
σ_2	Amortecimento viscoso das cerdas no modelo de LuGre
v_s	Velocidade relativa entre superfícies obtida pela curva de Stribeck
v_r	Velocidade relativa entre superfícies quaisquer
$\ddot{\theta}$	Aceleração angular
ρ	Parâmetro de histerese no modelo de Dahl

Sumário

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	Objetivos	3
1.2	Metodologia	4
1.3	Estrutura do Trabalho	5
2	BIOMIMÉTICA	7
2.1	Movimentação Cobra: Animais	8
2.1.1	Movimentação Cobra: Vantagens	11
2.1.2	Movimentação Cobra: Funcionamento	13
2.2	Robótica Modular	15
3	MODELAGEM DE MOVIMENTAÇÃO	19
3.1	Sobre os módulos na curva	19
3.1.1	Estrutura dos módulos	20
3.2	Parâmetros das Curvas de Movimentação	22
3.2.1	Ângulos de Bloco e de Junta	22
3.2.2	Determinação de Avanço	24
3.3	Funcionamento da curva	25
4	ATRITO	27
4.1	Definições de Força de Atrito	27
4.2	Elementos do Atrito	29
4.3	Sobre Modelos de Atrito	30
4.3.1	Modelos Estáticos e Dinâmicos	30
4.4	Medição de Atrito	32
4.5	Atrito Nas Cobras	33
4.5.1	Escamas Biológicas	34
4.5.2	Anisotropia no Atrito	35
4.5.3	Movimentação Cobra	37
5	MODELOS DE ATRITO UTILIZADOS	39

5.1	Modelo de Dahl	39
5.1.1	Obtenção dos Parâmetros de Dahl	40
5.1.2	Aplicação do modelo de Dahl	41
5.2	Modelo de Cerdas	42
5.2.1	Parâmetros do modelo	43
5.2.2	Modelo de Resetamento de Integrador	47
5.3	Aplicação dos Modelos	48
5.4	Efeito de Stribeck	49
5.5	Modelo de LuGre	50
5.5.1	Parâmetros do Modelo	51
5.5.2	Aplicação do Modelo	53
5.6	Resumo dos Modelos	54
	6 MEDIÇÃO E CONTROLE	57
6.1	Sensores Biológicos	57
6.2	Requisitos dos sistemas de medição	58
6.3	Controle de Movimento e Torque	59
6.3.1	Series Elastic Actuator: SEA	60
6.4	Compensação de Atrito	62
6.5	Medição de Distância Entre Dois Pontos	63
	7 SOBRE A ROTINA DE CALIBRAGEM	65
7.1	Lógica do Processo	65
7.2	Teoria Sugerida	67
7.2.1	Ponto de Atuação	68
7.2.2	Relação Entre os Sensores	69
7.3	Posicionamento e Âncora	71
7.3.1	Distribuição de Massa	73
	8 PROTÓTIPO DE VALIDAÇÃO: SÉRIE VDM	77
8.1	Estruturas Externa e Interna	77
8.2	Série VDM	78
	9 PROTÓTIPOS DE SUPERFÍCIE ANISOTRÓPICA	84
9.1	Acabamento superficial	84
9.2	Elaboração da Série Alpha	85
9.3	Testes Realizados com a Série Alpha	90
9.4	Sobre o uso de ressaltos laterais: Série A0	91
9.4.1	Teste em Papel Milimetrado com Placas A0	92
9.4.2	Testes em Papel Milimetrado com Conjunto Bloco-Placas A0	93
9.4.3	Superfícies iso e anisotrópicas: Testes com A0	95
9.4.4	Plano Inclinado Com Tempo: Série A1	97

9.5	Conclusões da Série Alpha e Desenho Série Beta	101
	10 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA ROTINA DE CALIBRAGEM	104
10.1	Obtenção da Força de Coulomb	104
10.2	Velocidade, Deslocamento e Parâmetros Iniciais	106
10.3	Comparação de Resultados Entre Dahl, Cerdas e LuGre	108
	11 CONCLUSÕES	112
11.1	Trabalhos Futuros	113
	REFERÊNCIAS	114
	APÊNDICES	120
	APÊNDICE A – CURVA DE MOVIMENTAÇÃO COBRA	121
	APÊNDICE B – MODELO DE DAHL	123
	APÊNDICE C – MODELO DE CERDAS	125
	APÊNDICE D – MODELO DE LUGRE	127
	APÊNDICE E – CÁLCULO CENTRO DE MASSA	129

Agradecimentos

Antes de mais nada, agradeço à três mulheres que jamais saberão a importância que tiveram neste trabalho. A primeira é minha mãe, Regina Célia, que sempre quis que eu fizesse engenharia tanto quanto sempre me encheu de livros, histórias, filosofia e arte. A segunda é Hiromu Arakawa, autora da minha história predileta e uma das maiores motivações em buscar mais conhecimento sobre o mundo, sobre a ciência e tudo que se encontra pelo meio. A terceira é Alexandra Elbakyan, uma mulher que correu riscos para lutar pelo que acredita e trazer mais conhecimento ao mundo.

Além delas, agradeço à Lewis Carrol, Neil Gaiman, Clarice Lispector, Raphael Draccon, André Vianco, Agatha Cristie, Eoin Colfer, Maggie Stiefvater, Stephan King, Machado de Assis, Susumu Hirasawa, grupo Clamp e a tantos, tantos outros, que me ajudaram nessa jornada de uma forma que eu jamais saberão.

Agradeço à minha orientadora, professora Dianne, que me mostrou o mundo da robótica modular e aceitou meus devaneios com o Valdemar.

Agradeço a duas pessoas que foram minhas corretoras durante todo o processo: Juliana Pedrosa e Monique Vilhena. Desde o texto até as figuras e a lógica do trabalho, elas foram incansáveis.

Mas o maior dos agradecimentos vai para minha namorada, minha melhor amiga, Geovana Callasans. Conhece-la foi provavelmente uma das melhores coisas que me aconteceram durante o curso de engenharia mecânica. Ela não só me ensinou a mexer no Latex, no Inkspace, me ajudou a resolver os problemas do Solid e do Matlab, como me apoiou durante todo o processo, brigando comigo incessantemente para que eu não deixasse as coisas de última hora. E brigando comigo todas as vezes em que deixei. Eu a agradeço sobretudo por se importar não só comigo, mas com meu trabalho e não só com o trabalho, mas também comigo. O nome do protótipo de validação aqui apresentado, VDM, ou Valdemar, é uma singela homenagem à ela, que foi quem o sugeriu.

Por fim, dedico este trabalho à minha falecida mãe, meu pai e meu avô, minhas maiores fontes de motivação desde o momento em que passei no vestibular até a entrega do trabalho final.

1 INTRODUÇÃO

Robótica modular e robô cobra não são conceitos novos - ambos possuem inúmeros trabalhos publicados por pesquisadores em diversos países, principalmente Noruega, (SANFILIPPO *et al.*, 2016), (TRANSETH *et al.*, 2008), Japão (FUKUDA *et al.*, 1988), (KAMEGAWA *et al.*, 2004) e Estados Unidos da América (HIROSE; MORI,),(DOWLING; WHITTAKER, 1997). Dentre estes, há algo em quase todas as publicações mais recentes, entre 2010 (LILJEBACK, 2011) e 2017 (PETTERSEN, 2017), concordam: os maiores obstáculos a serem superados são controle e movimentação - sendo que todos os dois esbarram inevitavelmente na questão do atrito.

Parte do problema de controle é a tradução entre comando e execução, na qual podem existir falhas devido à obstáculos inesperados (HATTON *et al.*, 2013), sendo que os "obstáculos" podem ser tomados em sentido literal, como pedras e paredes, ou mais amplo, como a força de atrito entre juntas. As explicações para essa imprecisão entre a previsão teórica e o resultado prático normalmente estão associados a torque e perda de eficiência por contato com o meio externo, o que pode ser contornado fazendo compensação do sistema com base no atrito deste (OLSSON, 1996).

Quanto à movimentação, a principal questão é como realizá-la. Desde a década de 90 existem alguns modelos matemáticos que definem as "curvas" de movimentação baseadas no comportamento de cobras biológicas, com diferentes eficiências na relação energia gasta/distância percorrida, (MA, 1999), mas a reprodução deste comportamento em robôs ainda não é completa, no sentido em que as soluções obtidas para a reprodução dos movimentos não são ideais ou os movimentos obtidos são limitados, (GOMEZ, 2008). Há de se notar que o sentido de "ideal" é aqui subjetivo, sendo um fato de importância o quanto os robôs se aproximam de cobras reais e quais os pontos negativos associados às soluções.

Assim como no caso do controle, o atrito também surge como um ponto relevante na movimentação, sobretudo ao se considerar cobras e outros animais ápodes (sem membros extras de movimentação, como patas). De fato, o atrito não só influencia o modo como as cobras se deslocam, (HU *et al.*, 2009), como a própria morfologia de seus corpos em nível macro e microestrutural, (BERTHÉ *et al.*, 2009).

Em suma, tanto o controle quanto a movimentação precisam de informações de atrito para uma melhor transmissão de conceitos teóricos (equações e previsões de posição) em casos reais, sobretudo considerando terrenos de características desconhecidas.

No caso de um terreno com o qual o robô não esteja acostumado, seus parâmetros base podem se tornar insuficientes. Se houver um caminho lubrificado ou granuloso, por exemplo, a superfície de contato muda e as compensações de atrito previstas podem não ser suficientes. Porém, uma grande parte do incentivo de desenvolvimento de robôs modulares com características ápodas é precisamente a exploração de locais inóspitos, como os restos de um prédio após um desabamento ou qualquer estrutura civil após um terremoto para fins de busca e salvamento, (YAMADA; TAKAOKA; HIROSE, 2013).

O ideal seria que o robô fosse capaz de obter um senso de realidade do local onde se encontra. Animais obtêm informações sobre seu ambiente de maneira automática, fazendo uso dos sensores ao longo de seu corpo que captam estímulos e os transformam em respostas, (DERBY; STEULLET, 2001). Robôs bio-inspirados podem fazer algo semelhante, como, por exemplo, através do cálculo do ângulo e da força de contato de membros com o solo, baseando-se em cachorros, ou pela análise da compensação feita em seu posicionamento em relação ao solo para manter o equilíbrio, (LEE; BIEWENER, 2011). No caso de um robô ápode bio-inspirado, um bom parâmetro de análise seria o atrito dinâmico observado durante seu ciclo de movimentação.

Uma possibilidade para a obtenção deste atrito é a realização de uma rotina de movimentação em conjunto com uso de sensores embarcados capazes de obter informações como distância real percorrida ou torque real dos atuadores envolvidos, em um procedimento similar à uma calibragem, comparando-se parâmetros dinâmicos reais e teóricos. O desenvolvimento para chegar nessa rotina de calibragem, como aqui será denominada, envolverá: revisão bibliográfica de robôs modulares e cobra, estudo sobre definições e modelos de atrito existentes na literatura, estudo de movimentação ápode com e sem atrito embasado na literatura, e a proposta de uma rotina de calibragem, incluindo procedimento, dados de entrada e saída, além de um protótipo que seja capaz de realizar a validação das teorias consideradas.

1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é estudar o fenômeno de atrito dentro do contexto de um robô ápode capaz de se deslocar usando equações de movimento inspiradas na locomoção de cobras terrestres, de maneira a facilitar sua movimentação, o qual envolve:

- Como as cobras se movimentam: determinar quais são os elementos do animal e sua relação com o terreno que permitem que este se mova sem o uso de membros auxiliares. Estudar sua morfologia do ponto de vista biológico e físico, desde sua anatomia até as características superficiais de suas escamas e como estas são traduzidas no contexto de um robô;
- A natureza do atrito: Compreender como o atrito influencia no problema em questão.

Qual sua relação com a forma como as cobras se movimentam e em que níveis esta se dá, principalmente buscando entender como as cobras o utilizam e como a evolução favoreceu certas características em seus corpos, como a anisotropia em suas escamas. Estudar sobre modelos de atrito estático e dinâmicos existentes, tanto para entender a lógica por trás de seu desenvolvimento e os fenômenos de atrito que eles cobrem, como a transição entre os estados de adesão e escorregamento, quanto para decidir sua aplicabilidade no caso do robô com movimentação ápole;

- Reprodução de anisotropia: verificar se é possível reproduzir as características anisotrópicas observadas em cobras de maneira artificial usando o mínimo de elementos extras no robô possíveis. Idealmente, apenas por meio de uma geometria superficial específica;
- A viabilidade de uma rotina de calibragem baseada apenas em trigonometria: analisar o quão viável pode ser considerada uma rotina baseada em relações trigonométricas, obtidas via sensores, e em características do robô, como sua massa e comprimento, tendo por fim a obtenção do atrito de um terreno qualquer, e como o dados obtidos por esta seriam aplicados em modelos de atrito pré-selecionados.

1.2 Metodologia

Inicialmente, dividiu-se o trabalho em dois pontos de partida: atrito e movimentação cobra, conforme o objetivo principal proposto. Buscou-se na literatura aspectos específicos à ambos e a relação entre estes. Contudo, conforme a revisão bibliográfica avançou, foi possível perceber que não só a dependência existente entre estes era ignorada ou simplificada, comportamento não inédito no que diz respeito ao atrito, como as características biológicas relacionadas e determinantes acabavam em artigos isolados. Tendo em vista tal tendência, o trabalho foi reformulado, sendo dividido não mais pelo início mas pelos resultados desejados, determinados por três frentes de interesse as quais fossem capaz de englobar todos os pontos de interesse e diretamente ligadas aos objetivos específicos. Durante a execução destas, usou-se design e desenho 3D de sólidos em computador, modelagem e simulação numérica e manufatura de elementos de teste.

Primeiro, obteve-se um modelo de robô modular capaz de realizar movimentação cobra. Esse modelo tinha por propósito apenas servir como exemplo durante o desenvolvimento da rotina de calibragem, ao oferecer massa e dimensões específicas, além de servir de referência para desenhos e esquemas. Contudo, o modelo acabou ganhando mais detalhes e discussões do que esperado, sendo um resultado colateral dos estudos conjuntos em robótica modular e movimentação ápole.

Em seguida, teve-se o desenvolvimento de escamas artificiais, utilizadas para reproduzir anisotropia na superfície dos módulos idealizados. A simples manufatura de escamas baseadas em estudos biomiméticos anteriores foi considerada insuficiente, de forma que

buscou-se não só a anisotropia, mas observar quais características aplicáveis às escamas artificiais à influenciariam e como. Para tal foram usados princípios básicos de design fatorial e resultados da literatura quanto à escamas biológicas, os quais foram aplicados à uma série de escamas com diferentes conjuntos de características, as quais foram comparadas entre si. Com isso, foram obtidos resultados não apenas quanto à anisotropia como dados dinâmicos que foram usados como entrada na simulação da rotina de calibragem.

A terceira frente foi o desenvolvimento do conceito da rotina de calibragem, simulada numericamente a fim de se obter uma noção da sua viabilidade em caso real, tendo em vista alcance e precisão de sensores disponíveis no mercado. Esse desenvolvimento foi baseado não só em princípios biomiméticos como em definições utilizadas em sistemas de controle e seu principal objetivo foi a obtenção de dados teóricos de um terreno qualquer para se mensurar o atrito relativo. Essa rotina leva em conta os parâmetros utilizados nas curvas de movimentação cobra mais difundidas na literatura e aspectos diversos do fenômeno de atrito, incluindo sua natureza e modelos comuns. Uma exigência da rotina, além de ser capaz de ser realizada usando apenas informações que o robô pudesse obter ou avaliar de maneira independente, foi que esta pudesse obter dados de entrada a serem aplicados em modelos dinâmicos de atrito, os quais devem retornar dados úteis ao robô, como velocidade esperada e força de atrito real.

1.3 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2, tem-se uma apresentação sobre os três conceitos base deste trabalho: biomimética, robôs cobra e robótica modular. Discute-se sobre a vantagens quanto ao uso destes dentro do contexto de engenharia e robótica, com enfoque em cobras biológicas e seus paralelos entre os três.

No Capítulo 3, são apresentadas as curvas de movimentação cobra que serão aqui consideradas e seus parâmetros de interesse, como a determinação de pontos do robô no espaço, diferentes tipos de movimentação possíveis e os elementos necessários para sua realização, como ângulos de atuação. Todos os pontos nele discutidos serviram de referência no desenvolvimento da rotina de calibragem.

No capítulo 4, o atrito é explorado de maneira abrangente, desde suas definições até seus fenômenos específicos. Há foco no atrito do ponto de vista das cobras, sobretudo no que diz respeito à anisotropia em três direções (frontal, lateral e traseira) observável no animal. São apresentados também alguns modelos de atrito, com um aprofundamento de três deles no Capítulo 5, o que envolve um breve estudo histórico quanto a seus respectivos desenvolvimentos e aplicações, além da reprodução numérica dos mesmos com base em dados da literatura.

O Capítulo 6 trata-se de uma breve discussão sobre métodos de controle e uso de sensores principalmente considerando robôs cobra e juntas de atuação, a fim de se ter

algum contexto para o desenvolvimento da rotina de calibragem, apresentado no Capítulo 7.

Um protótipo sugerido de robô modular com movimentação cobra é apresentado no Capítulo 8, o qual leva em conta tanto os princípios gerais discutidos previamente no Capítulo 1 quanto à implementação dos sensores do Capítulo 6 e a execução da rotina do Capítulo 7. De certa forma, o protótipo seria o ideal de validação da rotina e da reprodução de atrito cobra, reprodução esta discutida no Capítulo 9, onde se analisa a anisotropia de uma série de placas de escamas feitas artificialmente com base nas discussões de atrito do ponto de vista biomimético.

Por fim, no Capítulo 10, a rotina de calibragem aqui proposta é avaliada de forma numérica e aplicada nos três modelos de atrito do Capítulo 5 de maneira superficial, visando antes a validação de seu uso do que a obtenção de um modelo completo desta.

2 Biomimética

Conforme apresentado pelo *Biomimicry Institute*, a biomimética é uma linha de pesquisa voltada para o maior exemplo de engenharia em otimização: a natureza e seus seres vivos. Entretanto, ao contrário de animais que tiveram séculos, senão milênios, de evolução para aperfeiçoar suas características biológicas de acordo com suas necessidades e com o ambiente ao qual são apresentados, não é realista esperar mais de cem anos para se obter uma resposta a um problema de engenharia. E é por isso que o grande objetivo da biomimética não é necessariamente copiar seres vivos artificialmente, mas sim se inspirar nas soluções que a natureza apresenta para obter soluções aplicáveis em problemas humanos através de meios artificiais.

Um exemplo não confirmado, principalmente por ser uma invenção datada do antigo Egito, porém de fácil entendimento, são as pinças, as quais tem estrutura e funcionalidade semelhante ao bico de aves, (BAR-COHEN, 2005). Neste caso, tem-se apenas o uso da função imediata (recolher insetos e outros alimentos) de uma estrutura (bico) cujo movimento e morfologia é facilmente reproduzível (pinça) sem a necessidade de se reproduzir todo o ser do qual veio a inspiração (ave).

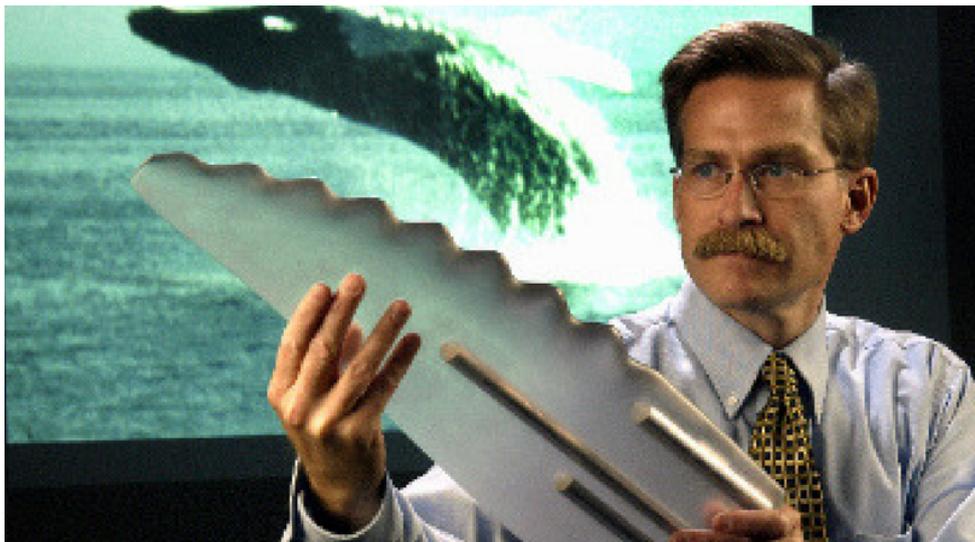


Figura 1: Exemplo de aplicação de biomimética na indústria: WhalePower. Fonte: <https://whalepowercorp.wordpress.com/the-science/>, Acessado em 20/08/2017.

Outro exemplo, mais óbvio, é a empresa *WhalePower Corporation*, que produz suas turbinas usando a curvatura e ranhuras das barbatanas de baleias como base, conforme

mostrado na Figura 1. Fazendo uma comparação entre *Newton e sua maçã*, o site da empresa discursa sobre a inspiração vinda da observação de uma escultura de baleia. Ao analisar a escultura, um engenheiro percebeu que a direção da barbatana em relação ao fluxo de fluido pelo qual o animal se desloca estava "invertida", quando comparada a uma turbina industrial comum. Essa primeira observação motivou uma série de estudos sobre a baleia corcunda, (*Megaptera novaeangliae*), com enfoque no formato de suas nadadeiras, o desempenho destas e, principalmente, como essas características poderiam ser aplicadas à um caso industrial real, (FISH et al., 2011).

Além de usos em indústria e equipamentos rotineiros, soluções biomiméticas também são de grande interesse em mecanismos para exploração de terrenos desconhecidos além de situações de busca e salvamento, nos quais elementos pesados, com movimentação dependente de rodas acabam limitados ao não conseguirem ultrapassar obstáculos ou manter seu equilíbrio em terreno inconstante, (BAR-COHEN, 2005). Além disso, esse tipo de equipamento, ao apresentar dificuldades em se locomover em terrenos instáveis sem o alterar pode piorar situações de desmoronamento, ao deslocar escombros e soterrar vítimas. Não por acaso, o uso de cães de resgate em equipes de bombeiros é amplamente aplicado em situações de desastre, como na busca por sobreviventes do ataque do *World Trade Center*, (LOPES, 2012). Assim, robôs que usem movimentação baseada em cães, (LEE; BIEWENER, 2011), ou outros quadrúpedes poderiam ser usados nessas situações com mais segurança para humanos e animais.

Além de robôs quadrúpedes, teorizados para caminhar sobre os escombros, existe uma outra classe de robô bioinspirado de grande interesse para a área de busca e salvamento: robôs cobra. Ao invés de escalar obstáculos, essa ramificação de robôs é pensada para poder entrar em espaços apertados, podendo assim adentrar por níveis mais profundos de zonas de desmoronamento em busca de sobreviventes, (KAMEGAWA et al., 2004), com risco mínimo de soterramento por distúrbio externo.

Entretanto, para que um robô cobra seja realmente eficaz em terrenos reais, o primeiro passo é obter uma reprodução de locomoção o mais próxima possível do animal, a qual apresenta várias especificidades, mas também um grande número de vantagens para terrenos desconhecidos, (DOWLING; WHITTAKER, 1997).

2.1 Movimentação Cobra: Animais

Tratando-se de um conceito biomimético, o entendimento da morfologia de robôs cobras e de seus modelos de movimentação deve passar antes por uma análise da biomecânica do animal. Ressalta-se que essas análises não são necessariamente válidas para outros robôs ápodas, que sejam inspirados em enguias, lagartas ou outros.

O primeiro ponto é a estrutura de seu corpo, diversa de outros animais terrestres não pela sua composição, mas pela repetitividade (redundância) observada, (LILJE-

BACK, 2011).

Considere que a cobra possui três elementos que definem seu movimento: vértebras, músculos e escamas. Essa mesma estrutura se repete por toda extensão do animal, com exceção do crânio, sem mudança de função ou de funcionamento. Nessa tríplice, as vértebras são responsáveis pela alta flexibilidade do animal. Supondo uma perna humana, por exemplo, a mobilidade do membro vem principalmente da rótula do joelho e das demais junções móveis entre os quadris e o pé. A perna como um todo possui maiores possibilidades de movimento do que apenas a coxa, por possuir um maior número de juntas. Assim sendo, a cobra que tem seu corpo basicamente todo formado por uma sequência de conexões entre estruturas rígidas, como indicado na Figura 2, é capaz de dobrar seu corpo em curvas ou sobre si mesmo. Entretanto, estes movimentos só são possíveis devido aos músculos do animal, os quais determinam padrões de movimento alternando-se entre contração e relaxamento num sistema que poderia ser descrito como pneumático, (BORENSTEIN; HANSEN; BORRELL, 2007).

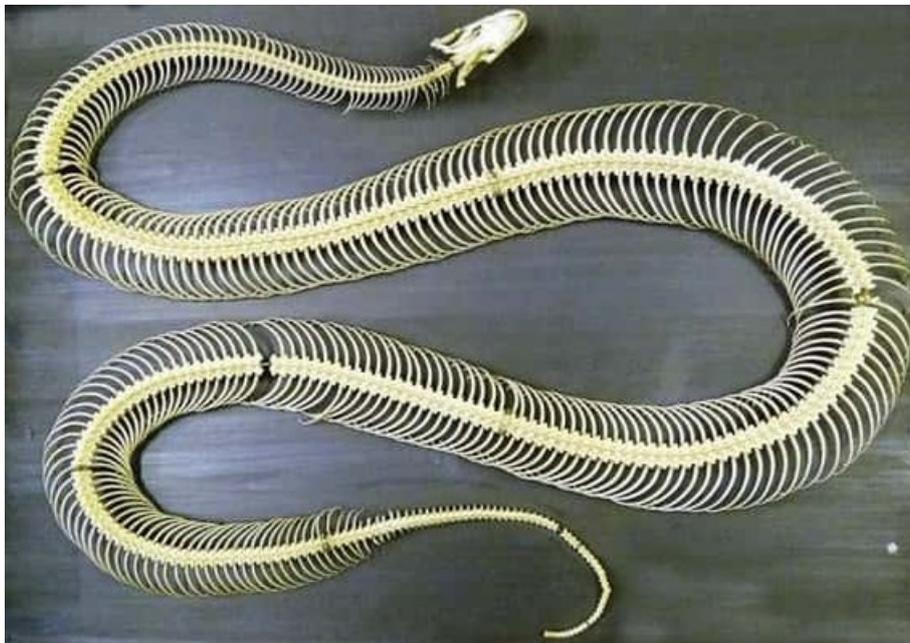


Figura 2: Esqueleto de Cobra, demonstrando as vértebras e a estrutura da espinha. Fonte: <http://www.robinsonlibrary.com/science/zoology/reptiles/squamata/serpentes/locomotion.h> Acessado em 27/08/2017.

Mas a cobra não está completa sem suas escamas, sem elas o animal seria incapaz de realizar qualquer deslocamento se não por forças externas, mesmo ativando seus músculos e dobrando seu corpo. Toda escala e classe de movimentação realizada por cobras tem a participação de suas escamas em algum nível, ou uso de suas características superficiais anisotrópicas- nome dado quando se observa mais de um coeficiente de atrito em uma superfície. No caso das cobras, o atrito é maior lateralmente do que longitudinalmente no sentido do movimento, (MARVI et al., 2016). Em (LILJEBACK, 2011), são introduzidos alguns dos movimentos mais comuns, incluindo o papel das escamas nestes, conforme indicado na Tabela 1.

Movimento	Utilização	Interação com Terreno
Movimentação Lateral	Terrenos de baixo escorregamento ou debaixo d'água	A cobra faz uso das irregularidades do solo - ou da resistência da água - e de suas distribuições desigual de peso para empurrar seu corpo. Neste caso, não há contato estático em nenhum ponto do movimento
Movimentação Linear	Antes do bote de uma presa. O menos eficiente porém mais silencioso	A cobra distende e contrai partes do seu corpo de forma alternada, de forma a esticar suas escamas e usá-las como anzóis, enganchando-as em irregularidades do terreno
Concertina	Espaços estreitos e de movimento limitado	A cobra usa paredes do local onde esteja e a disposição de suas escamas para se movimentar num sistema de ancoragem alternada: enrola parte do corpo, aumentando a influência do atrito ali, e movimenta o restante

Tabela 1: Movimentação Cobra

Em termos de comparação de eficiência, existe um quarto movimento, chamado *sidewing*, que é mostrado na Figura 3 - junto aos outros três que serão considerados neste trabalho. De certo modo, é o movimento cobra mais eficiente, porém de menor aplicabilidade em situações gerais - além de depender muito mais da característica do terreno que do atrito do animal. Essencialmente realizado em ambientes desérticos ou arenosos com dunas/montes, nos quais a cobra usa gravidade e o fator de escoamento do terreno (areia) para rolar seu corpo de um ponto mais alto a outro mais baixo.

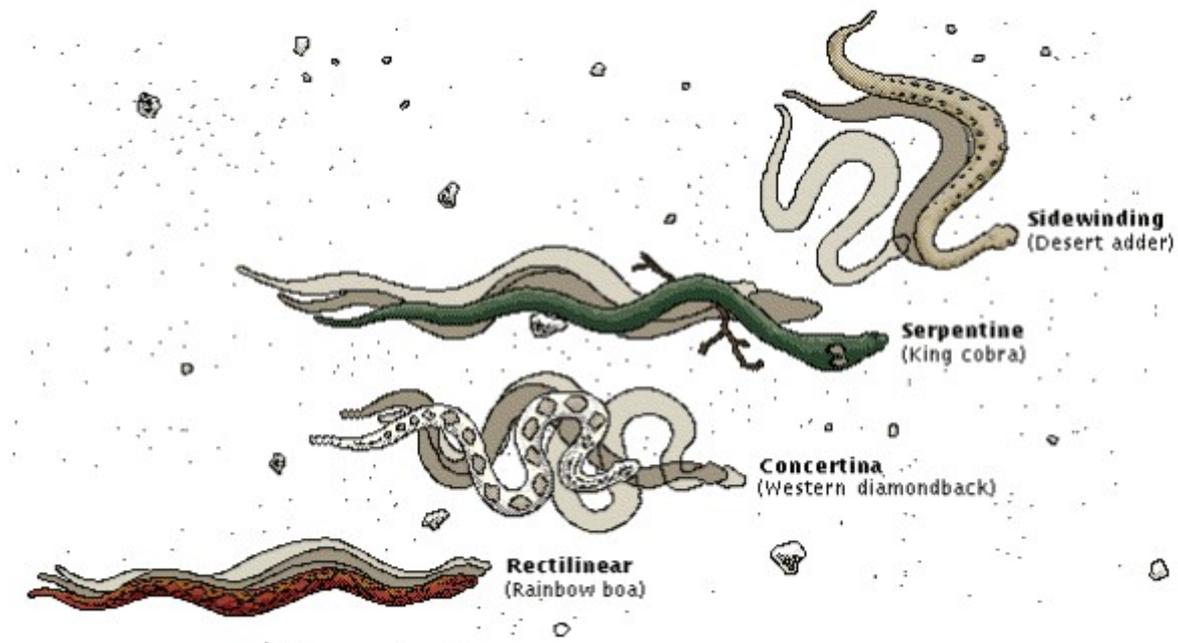


Figura 3: Movimentos realizados por cobras. Fonte: <http://www.robinsonlibrary.com/science/zoology/reptiles/squamata/serpentes/locomotion.htm>, Acessado em 23/09/2017.

Em suma, ao contrário da maioria dos animais terrestres, que se apoiam essencialmente no controle inercial e equilíbrio de pêndulos invertidos para se locomoverem, (LEE; BIEWENER, 2011), as cobras dependem mais do atrito e da angulação de seus corpos. É verdade que as cobras tendem a se mover mais lentamente que outros animais terrestres - sobretudo quadrúpedes - tendo uma média de 13 km/h, a depender da espécie, entretanto, seu estilo de movimentação e sua constituição geral trazem vantagens consideráveis em termos de robótica.

2.1.1 Movimentação Cobra: Vantagens

Uma revisão aprofundada quanto a robótica modular é feita na Seção 2.2, mas antes de se discutir as vantagens da movimentação cobra, é apresentado um resumo de conceitos base relativos à robótica modular, (BENHABIB; DAI, 1991), e como eles se relacionam ao caso de um robô bioinspirado em movimentação cobra, (MELO et al., 2013), junto à Figura 4, a fim de tornar futuras explicações desta seção e do restante do trabalho mais claras:

- **Módulo.** Menor estrutura independente, equiparável às vértebras de uma cobra. São eles que permitem o deslocamento total da estrutura através do conjunto de seus movimentos individuais. Devem ser pensadas de forma a ter mínimo peso e inércia individuais, a fim de facilitar o deslocamento da estrutura;
- **Juntas.** Responsáveis pela atuação dos módulos e entre eles, além de, em alguns casos, conexão. São equiparáveis aos músculos e conexões entre vértebras da cobra, enquanto responsáveis pela manipulação das estruturas individuais;
- **Robô.** Estrutura composta pelos módulos conectados entre si. Seria o equivalente à cobra. O movimento do robô deve ser compreendido como uma resultante das mudanças de posição dos módulos realizadas pelas juntas e atuadores.

Em (DOWLING; WHITTAKER, 1997), são apresentadas as principais vantagens do movimento apodal em relação ao de outros animais, sendo as mais relevantes no âmbito deste trabalho, enquanto guias para características a serem consideradas durante a rotina de calibragem e da produção do protótipo de validação, aqui apresentadas com adições relevantes aos conceitos de robótica modular:

- **Estabilidade** Devido a natureza de seu movimento e de seu arranjo de componentes, um robô cobra, em geral, não pode ser derrubado. Ele pode rolar ou escorregar por um terreno de alta inclinação, mas não ser derrubado por forças externas, como um empurrão. Como discutido em (LEE; BIEWENER, 2011), boa parte dos robôs de movimentação bioinspirada quadrúpede e bípede baseia-se em casos modelados por pêndulos invertidos. Nestes, a cada passo há gasto energético extra do robô para

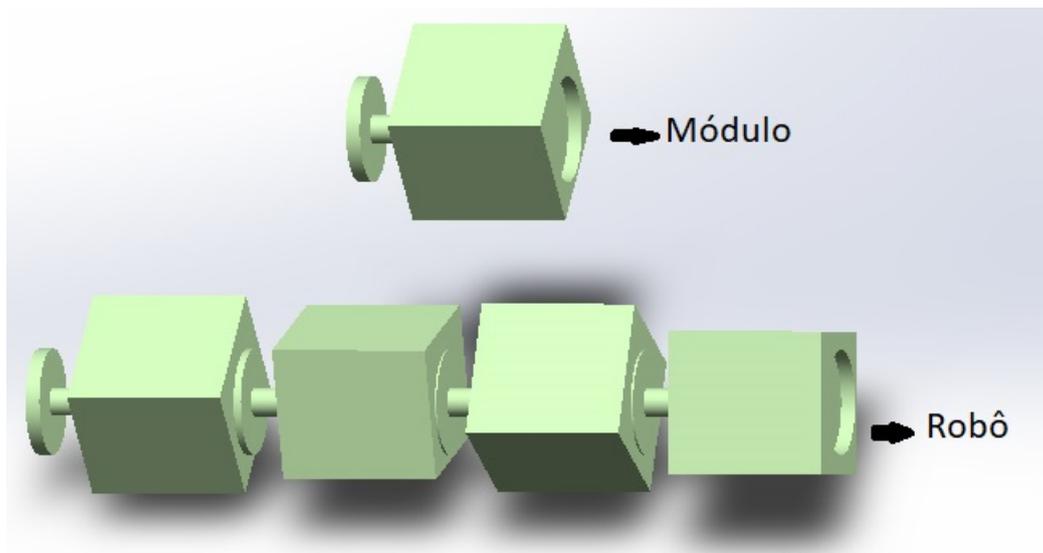


Figura 4: Diferenciação simples entre Módulo e Robô

se reajustar numa posição de equilíbrio. Um robô cobra, por outro lado, pode ficar equilibrado mesmo sem atuação das juntas, poupando energia. Além disso, dependendo do nível de sua característica modular, o robô pode alterar sua configuração para uma mais adequada a diferentes situações de espera, ou se separar em robôs menores, favorecendo seu uso em busca e salvamento.

- **Adaptabilidade de Terreno** Assim como robôs modulares, robôs cobra possuem um alto nível de adaptabilidade a situações não previstas. O movimento das cobras permite desvio de obstáculos, avanço em escadas, locomoção por ambientes restritos e angulosos. A dificuldade está na modelagem desse movimento e no cálculo dos parâmetros do mesmo, mas isso não lhes tira factibilidade.
- **Redundância** Uma das maiores vantagens de robôs modulares é o fato de que, caso um módulo sofra dano, este é facilmente substituível ou mesmo desprezado, contanto que respeitadas as condições mínimas de movimento do robô, as quais dependem da equação utilizada, sendo um exemplo apresentado na Seção 3.2.1. No caso de avaria, o robô poderia apenas se reorganizar - ou ser reorganizado - a fim de continuar a missão. Assim, a redundância, por vezes vista como desvantagem por trazer falta de especialização de partes específicas do robô, torna-se uma vantagem para casos onde danos são esperados.

Uma vantagem um pouco mais discutível de robôs apodais, ou quaisquer outros cujos elementos permitam simulação de movimento animal, é a possibilidade de um robô cujo avanço não dependa de rodas. O uso de membros, ou da estrutura do corpo no caso das cobras, para deslocamento resulta em constante impacto entre o robô e o terreno. Ainda que o pensamento imediato seja negativo ao fato, por questões de desgaste e mesmo deformações, em caso de terrenos inóspitos essa característica torna-se uma vantagem. A movimentação por princípio de impacto permite que o robô receba informação das forças

aplicadas, de modo que ele possa as direcionar para melhor aproveitamento energético além de reconhecimento de características do terrenos, como discutido em (GONZALEZ-GOMEZ et al.,).

2.1.2 Movimentação Cobra: Funcionamento

O nome *robô cobra* sugere a existência de alguma característica intrínseca ao mecanismo que possua semelhança com o animal, mas falha em especificar a natureza desta. Em se tratando de uma tecnologia biomimética, um robô cobra poderia se parecer com o animal ou comporta-se como tal. Entretanto, conforme será aqui discutido ambos aspectos são co-dependentes: um robô cobra só pode se mover como uma cobra enquanto sua morfologia se aproximar do animal, uma consequência do desenvolvimento das equações de movimento normalmente aplicadas na literatura.

Uma definição comum aplicada a robôs de característica cobra (com comprimento consideravelmente superior a largura, o que traz aspecto longo e fino, obtido pela conexão de várias estruturas em geral homogêneas) é **ACM**, sigla para *Active Cord Mechanism*, (HIROSE; MORI,). Em tradução livre, seriam Mecanismos de Corda Ativados. Graças à este formato, dos três movimentos apresentados na Seção 2.1, robôs cobra podem reproduzir dois para se movimentarem em terreno paralelo à si mesmos: Retilíneo e Serpentino. Existem ainda aqueles que reproduzem a característica espiral do corpo das cobras - enrolando-se em estruturas retas e as escalando, como melhor explicado na Seção 3.2.1.

Neste trabalho, o interesse quanto à movimentação restringe-se àquela realizada por robôs em terrenos aproximadamente planos, porém com diferentes níveis de inclinação, contando com escalada de obstáculos como escadas e entulhos mas excluindo escalada de árvores, postes e estruturas similares. Além disso, serão considerados apenas movimentos realizados exclusivamente através de comandos *pitch* e *yaw* em atuadores, em acordo com a Figura 5, tanto para as análises de equações e modelos de movimento quanto para o desenvolvimento da rotina de calibragem a ser realizada pelo robô.

Assim, já tendo sido feita a discussão sobre as formas como o animal biológico se desloca no ambiente fazendo uso de seus recursos anatômicos na Tabela 1, discute-se agora sobre como o robô pode o imitar na Tabela 2, aproximando os movimentos biológicos de equivalentes baseados em conjuntos de comandos *pitch* e *yaw*, (GOMEZ, 2008).

Resumindo, todos os movimentos executados por um robô cobra podem ser discriminados em comandos *pitch* e *yaw*. O que os diferencia são os ângulos de junta realizados e as curvas matemáticas de movimentação utilizadas. A maioria dos robôs cobra segue duas curvas: **Serpenóide** (*serpenoid curve*), (HIROSE; MORI,), e **Serpentina** (*serpentine curve*), (MA, 1999).

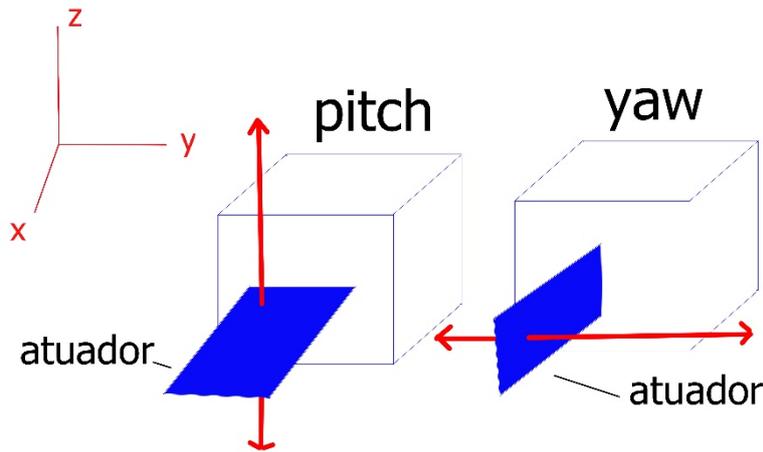


Figura 5: Simplificação de movimentos pitch e yaw.

Nome	Comparação	Funcionamento
Movimentação de Corpo	Movimento Linear e Concertina	Basicamente qualquer combinação 2D de <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i> , onde o robô se movimenta para a frente
Movimentação de Cabeça	Concertina	Movimento 3D, em geral um movimento <i>pitch-yaw</i> em que há levantamento da cabeça ou outra parte da estrutura, em geral seguindo <i>sinus lifting</i> , característica explicada no Capítulo 3
Movimentação por Agarramento	Não se aplica	Neste caso, o robô enrola sua estrutura ao redor de um alvo e usa movimento de rotação do corpo e módulos, normalmente em seus próprios eixos, para movimentar-se

Tabela 2: Movimentação Robô Cobra

No trabalho onde a curva Serpentina é introduzida, Ma explica que a locomoção lateral depende do impedimento de escorregamento na direção normal ao movimento, ou seja, tem-se uma *side-slip condition*: condição de escorregamento lateral. Como discutido em 2.1, um dos principais elementos na movimentação das cobras são suas escamas, particularmente devido a sua característica anisotrópica. No caso, os coeficientes nas direções longitudinais e transversais da cobras divergem de tal forma que o movimento é impedido em uma direção e na outra não. É isso que as rodas usadas por alguns robôs simulam. Isso só é válido entretanto quando as rodas são separadas e de fato mudam a característica da superfície da contato, (YAMADA; HIROSE, 2006), (KAMEGAWA et al., 2004), e não quando o sistema de rodas não influencia na superfície ou a recobre por completo, conforme ilustrado na Figura 6.

Contanto que sejam seguidas as condições iniciais e estruturais exigidas por cada curva, qualquer robô pode realizar movimentação cobra. Inclusive, existem robôs modulares com características ápodas que não necessariamente se encaixam como robô cobra.

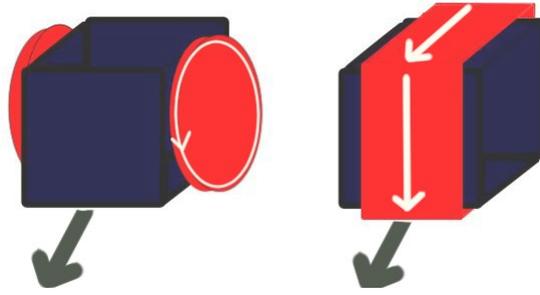


Figura 6: Dois diferentes tipos de orientação de roda em relação a um módulo: rodas laterais, (YAMADA; HIROSE, 2006) e roda estilo esteira (KAMEGAWA et al., 2004).

De fato, nem todo robô modular é um robô cobra, assim como em geral robôs cobra não devem ser considerados modulares, pois não são capazes de se separar em estruturas individuais funcionais.

2.2 Robótica Modular

Os robôs cobras são inspirados em um animal já completo e estudam como este se relaciona com o ambiente em que se encontra. Nessa linha, pode-se dizer que os robôs modulares se inspiram na escala micro-estrutural de organismos vivos.

A menor estrutura funcional de um organismo é a célula que, através de modos organizacionais é capaz de formar tecidos, órgãos e seres complexos. Essa é a mesma lógica dos robôs modulares, explicitada pela primeira vez com o CEBOT, em (FUKUDA et al., 1988). Inclusive, o nome CEBOT vem do princípio de um robô formado por *cells*. Basicamente, tem-se uma estrutura complexa separada em unidades, não como peças mas sim como elementos funcionais independentes. Tanto quanto o avanço e desempenho totais devam ser considerados em termos do conjunto completo, a capacidade de dividir a *Cobra* em suas *Vértebras* permite uma gama de ações mais ampla.

Entre robôs modulares existem mais algumas definições além das apresentadas na Seção 2.1.1, relacionadas ao que define um robô modular e aos tipos de conexão e movimentação comumente vistas nestes, (BOEMO SCALVINONI Translator; Walter Routley, 2008), conforme se segue:

- **Reconfigurável:** Todo robô modular que consegue mudar sua geometria ou modo organizacional, com ou sem influência humana, e ainda ser capaz de realizar tarefas úteis, como mover-se;
- **Lattice/Grade:** Em geral associado a sistema de conexão de garras, é normalmente aplicado a robôs cuja movimentação depende de uma superfície com reentrâncias negativas às garras, nas quais o robô se conecta para se deslocar ou estabilizar;

- **Chain/Corrente:** Dito quando a locomoção do robô é feita necessariamente em série e normalmente de forma periódica, como explicado em 3.2.2. O alcance no espaço limitado pelos tamanho e número dos módulos;
- **Híbrido:** Mistura entre Lattice e Chain;
- **Passo/ *Gait*:** Modo como o robô se movimenta. Um mesmo robô pode ter diferentes *gaits*;
- **Armadura:** Estrutura externa que recobre os componentes do robô e que entra em contato direto com a superfície pela qual ele se move.

Apresentados os conceitos base, uma forma de se familiarizar com os conceitos e aplicações de robótica modular é através de protótipos e projetos relevantes na literatura, como o Polybot, (YIM; DUFF; ROUFAS, 2000). Desenvolvido 10 anos depois do CE-BOT, trata-se de um robô estilo corrente com movimentação bípede, multi-pedal e cobra (concertina). Ou seja, através da reconfiguração de seus módulos, contanto que mantida uma conexão serial, um mesmo robô seria capaz de realizar três estilos de passo distintos, mas uma de suas propostas mais interessantes era *movimentação corrente*. Além da característica serial, nessa movimentação os módulos assumiriam forma de aro e então rolariam pelo terreno. De caráter mais teórico, o modelo Polybot possuía armadura aberta e alimentação por fonte externa para se movimentar.

Em termos de reconfiguração, um dos projetos mais relevantes é o M-Tran (*modular transformer*), com desenvolvimento indo de 1999 até 2005, incluindo publicações sobre sua lógica de organização, (MURATA et al., 2002), estilo de movimento, (KUROKAWA et al., 2002) e sobre evoluções do projeto inicial, (KUROKAWA et al., 2008). Com movimentação bi e tridimensional e lógica híbrida, o M-Tran possui 6 faces para conexão com característica *lattice* por cada unidade independente, a qual é formada por um conjunto de duas estruturas espelhadas conectadas por um atuador, como indicado na Figura 7. O M-tran é capaz de se movimentar usando o estilo corrente proposto pelo Polybot, como ápole *pitch-pitch*, quadrúpede além de subir escadas. Trata-se de um verdadeiro robô metamorfo, capaz de realizar suas mudanças de morfologia de maneira independente (sem auxílio humano) graças a seu sistema de conexão e desconexão entre estruturas independentes com características macho-fêmea realizadas por garras.

Outro exemplo de robô modular com foco na reconfiguração são os *roombots*, (SPROEWITZ et al., 2008), módulos arredondados que possuem movimentação tridimensional sendo um de seus pontos mais interessante a atuação das juntas: os módulos usam movimentos rotacionais gerados por atuadores localizados em sua seção transversal diagonal de modo que um módulo rotaciona o outro em uma certa angulação, dada pela própria geometria, permitindo um espectro maior de reconfiguração. De fato, um único módulo pode girar ao redor de seu ponto de apoio, aumentando os pontos de posicionamento possíveis. O objetivo desse projeto é a criação de *móveis reconfiguráveis*. No caso,



Figura 7: Módulos do M-Tran sendo, da esquerda pra direita, os módulos I de 1998, II de 2002 e III de 2005. Fonte: <https://unit.aist.go.jp/is/frrg/dsysd/mtran3/>, Acessado em 20/09/2018).

com um mesmo conjunto de módulos poderia-se ter uma cadeira ou uma mesa ou suporte qualquer. Entretanto, seu uso exige uma superfície de adesão e movimentação específica, característica necessária em robôs da classe *lattice*. Essa superfície para adesão foi pensada para solucionar o problema do equilíbrio: com ela, um conjunto de três módulos empilhados em sentido paralelo à superfície designada pode rotacionar um conjunto de quatro módulos sem o risco de tombamento por desequilíbrio.

Algo que esses quatro projetos em robótica têm em comum é a busca por novas formas de explorar os limites da configuração modular, com destaque para a possibilidade de sair de uma geometria A para uma geometria B, ou expandir de uma situação C para uma situação D, como exemplificado na Figura 8, sem se perder a autonomia e a capacidade de deslocamento do robô, a qual deve ser apenas recalculada em função dos módulos restantes, como será discutido com mais detalhes no Capítulo 3.

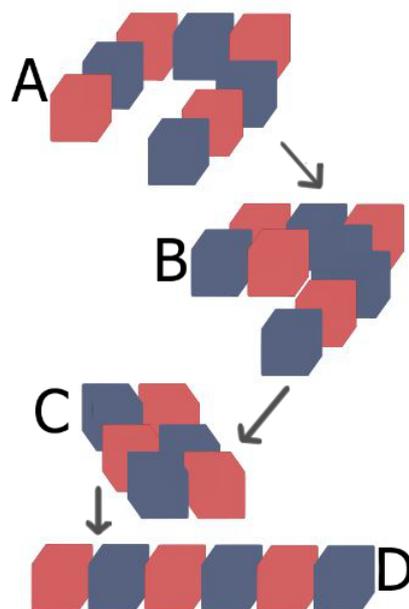


Figura 8: Robô modular ápole com quatro morfologias diferentes.

Em termos de contextualização e quanto às inspirações por trás da proposta e lógica da rotina de calibragem buscada nesse trabalho e, principalmente, por trás da criação de um protótipo de validação, devem ser considerados os robôs desenvolvidos pelo grupo EREKO entre 2012 e 2015.

Com forte inspiração do design do M-TRAN, o projeto começou com a *Série Ereko*, compostos pelos Ereko β , (COSTA et al., 2010) Ereko α , (SOUZA et al., 2011), Ereko Sigma (SOUSA; VIANA et al., 2014), e Sigma-Lily,(GUIMARÃES et al., 2016), com alguns dos protótipos demonstrados na Figura 9. O projeto Ereko começou com o objetivo de construir um robô modular funcional de característica reconfigurável, mas evoluiu para aplicação de sensores, inspeções de tubulação e análises independentes de áreas específicas, como comunicação de dados entre módulos, alimentação e movimentação.

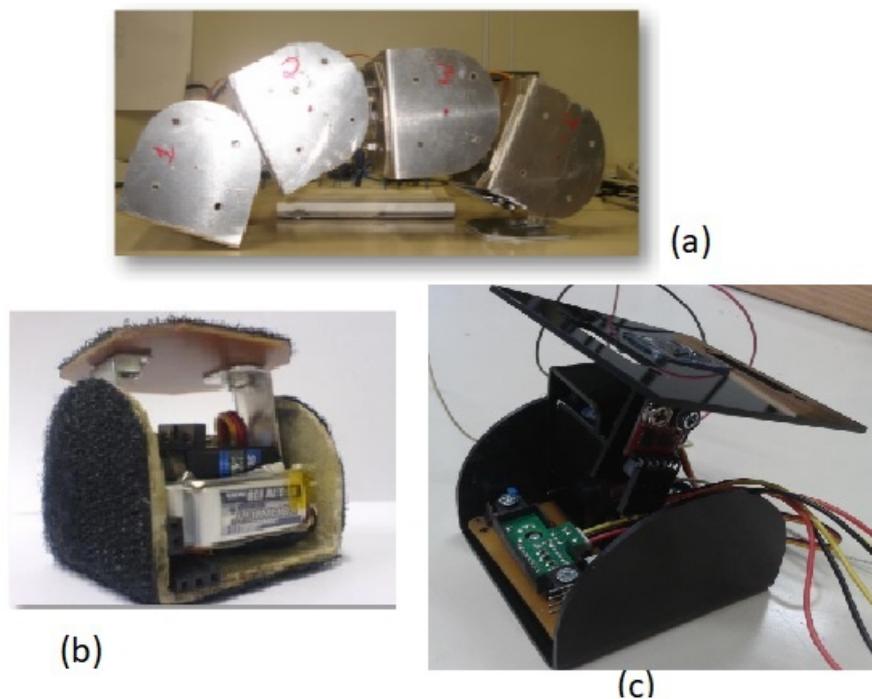


Figura 9: Módulos Série Ereko, (a)Ereko β , (b)Ereko α , (c) Sigma Lily).

As principais contribuições do Ereko e seus projetos neste trabalho diz respeito a conceitos de robótica e a resultados de simulações e testes, principalmente sobre como suas estruturas interagem com diferentes aspectos de interesse, como movimentação *pitch-pitch*, *pitch-yaw* entre outros, com abordagem mais ampla no Capítulo 3.

3 Modelagem de Movimentação

Neste capítulo, descreve-se a lógica empregada na modelagem equações de movimentação baseadas em cobras, a fim de determinar quais parâmetros devem ser considerados durante a rotina de calibragem. As informações aqui apresentadas seguem as seguintes considerações:

- A modelagem prevê o movimento do robô em superfícies de diferentes ângulos e diferentes composições ;
- Todos os módulos do robô enquanto na superfície de contato são influenciados pelas forças de atrito;
- Assume-se que os módulos são capazes de estimar a distância máxima e mínima teórica entre si com base em sua geometria e nos ângulos de junta executados;
- Os parâmetros de posição utilizados são o centro de gravidade do módulo e sua junta;
- A geometria do módulo será tão irrelevante quanto possível, a fim de tornar a modelagem tão abrangente quanto possível.

Ressalta-se que o desenvolvimento do movimento completo do robô não será abordado, principalmente em luz de que um robô atuante está fora do escopo deste trabalho. O conteúdo apresentado neste capítulo tem fins de se obter embasamento teórico e lógico para o desenvolvimento da rotina de calibragem.

3.1 Sobre os módulos na curva

Todo o desenvolvimento da movimentação baseia-se no conceito de curvas, como explicitado em 2.1.1. Usando a nomenclatura referente à robótica modular, essas curvas são compostas pelos **módulos**, interligados por **juntas**, diretamente conectadas aos **atuadores**, onde cada um desses elementos deve ser compreendido conforme descrito à seguir:

- **Módulo** - Menor unidade constitutiva do robô. Um módulo sozinho não tem movimentação autônoma. Todo módulo tem um peso, centro gravitacional e geometria dos quais dependem a formação da curva locomotora e a movimentação do robô. Normalmente são homogêneos ao longo do robô, e aqui serão separados em três tipos: cabeça (primeiro módulo no sentido positivo do movimento), cauda (primeiro módulo no sentido negativo do movimento) e espinha (todos os módulos entre a cauda e a cabeça);
- **Junta** - Ponto de conexão entre dois módulos, normalmente também ligada ao braço do qual comprimento determina o arco de movimentação realizável pelo respectivo módulo. Não serão considerados detalhes quanto ao tipo de conexão, apenas suas especificações geométricas, como ângulo de atuação e graus de liberdade;
- **Atuadores** - Estruturas independentes capazes de gerar movimento. Na literatura, nota-se predominância de servos motores como atuadores, devido à sua relação entre torque e velocidade. Conectados diretamente nas juntas, sua seleção afeta e é afetada pelos peso e dimensão interna dos módulos.

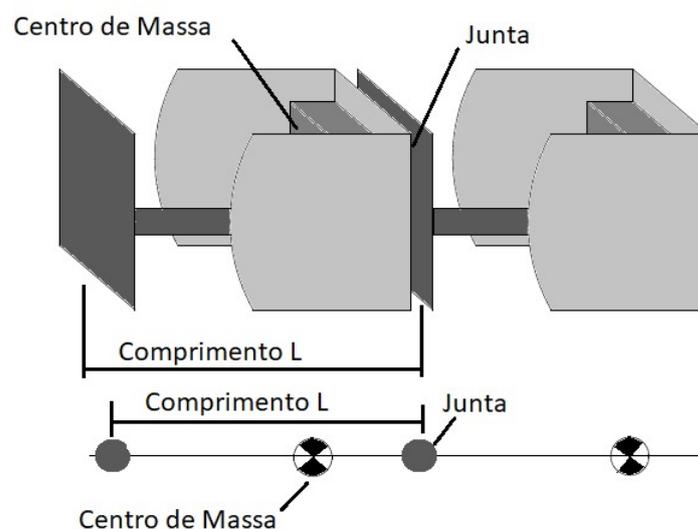


Figura 10: Representação de robô em modelagem: Os comprimentos entre as juntas e as posições de centro de massa devem ser as mesmas, porém complexidade geométrica é removida

As curvas de movimentação em geral consideram uma estrutura simplificada, como indicado na Figura 10, o que por vezes esconde limitações geométricas construtivas da estrutura, porém isso não traz perdas ao modelo.

3.1.1 Estrutura dos módulos

Pensando no fator da redundância, discutido na Seção 2.1, idealmente os módulos ao longo do robô devem ser idênticos. Entretanto, será aqui considerada a possibilidade

de módulos heterogêneos conquanto que todos possuam o mesmo comprimento L de uma junta à outra e que todos sejam capazes de realizar os mesmos ângulos de atuação, ainda que em orientações diferentes. Assim, o comprimento total do robô é dado por $L.N$, com N sendo o número total de módulos, o qual deve ser tal que permita a realização de um ciclo de movimentação completo. Esse número mínimo será abordado mais adiante.

Outro fator estrutural a ser considerado são os graus de liberdade dos módulos. Todos os módulos devem ter no mínimo um grau de liberdade (GDL) a fim de serem capazes de realizar as curvas de movimentação cobra, com isso, o robô terá no mínimo N GDL. Idealmente, o conjunto junta-atuador responsável por este GDL deve ser tal que permita que o conjunto de módulos tenha no mínimo dois GDL, como mostrado na Figura 11, o que seria o equivalente à um conjunto capaz de realizar movimentação *pitch-yaw*.

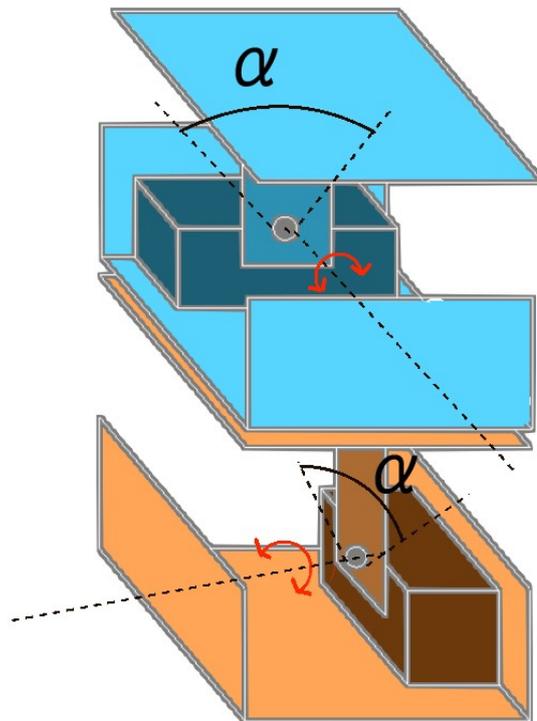


Figura 11: Representação de grau de liberdade nos atuadores. No caso, os dois módulos são 1-GDL, com GDLs perpendiculares, ambos relacionados e um grau máximo de movimentação α

Não há uma definição de angulações máximas e mínimas a serem realizadas pelos módulos nem na teoria de robótica modular nem nos artigos referentes às curvas de movimentação cobra, apenas que o atuador deve permitir um alcance dentro do intervalo $[-\alpha, \alpha]$. Assim, pode-se resumir que contanto que todos os módulos tenham o mesmo comprimento l e ao menos um grau de liberdade eles são passíveis de realizar movimentações ápole baseadas nas curvas cobra.

3.2 Parâmetros das Curvas de Movimentação

O termo "curva" é literal: os robôs cobra se movimentam de tal forma que realizam uma curva no espaço conforme avançam, da mesma forma que um animal durante suas locomoções concertina ou lateral. Serão aqui considerados os parâmetros em acordo com três fontes: os estudos de Hirose e o desenvolvimento da curva Serpenóide, a curva Serpentina de Ma, (MA, 1999), ambos com base nos trabalhos dos autores e nos estudos experimentais apresentados em (MU et al., 2017) e trabalhos relacionados, e o modelo simplificado de Liljebäck, (LILJEBACK, 2011).

3.2.1 Ângulos de Bloco e de Junta

Seja a ligação entre dois módulos denominada um bloco. Podem existir blocos *pitch-pitch*, *pitch-yaw* e *yaw-yaw*, (GOMEZ, 2008). Assim, o ângulo de bloco α_i diz respeito ao ângulo feito pelo bloco em relação às coordenadas globais. A diferença entre os ângulos de dois blocos dá o ângulo de junta, tal que $\phi_i = \alpha_i - \alpha_{i+1}$. Ao longo de um robô, então, tem-se N ângulos de bloco e N-1 ângulos de junta, conforme Figura 12.

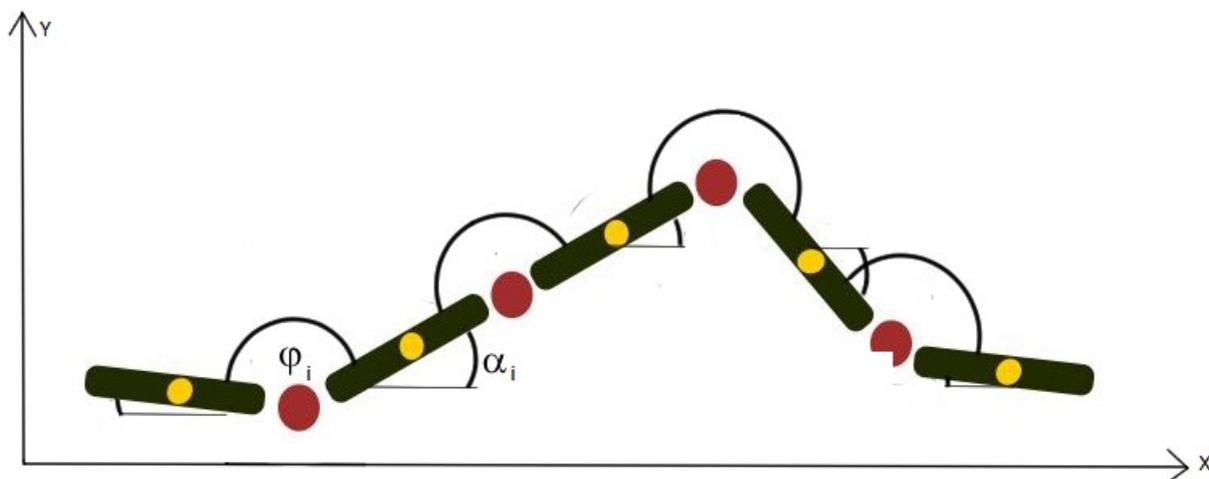


Figura 12: Representação dos ângulos de bloco α_i e de junta ϕ_i ao longo de uma curva

Deve-se notar que estas definições supõem que dois módulos sequenciais estejam paralelos à todo momento. Entretanto, a mesma lógica de definição dos ângulos pode ser aplicada considerando blocos de um único módulo (*pitch* ou *yaw*) sem perda de informação, consideração importante ao se pensar em ancoragem, onde parte do robô deve estar tão compacto quanto possível.

No caso da curva serpenoide de Hirose, é considerado ainda o fator de curvatura k . Derivado da curvatura do corpo das cobras devido ao alcance de atuação de seus conjunto vértebra-músculo, pode ser simplificada como $k = \frac{l_m - l_{m0}}{\alpha \sigma s}$, onde o denominador

determina o arco realizável e o numerador, a diferença de comprimento entre o músculo relaxado e comprimento, (MA, 1999). Essa relação é reescrita para aplicação em robôs cobra compostos de N seções (módulos) de comprimento L como $k(s) = -\frac{2K_n\pi\alpha_0}{NL}\sin\frac{2K_n\pi s}{NL}$, (MU et al., 2017), onde:

- α_0 é chamado ângulo inicial e determina o formato geral da curva, de forma que para $\alpha_0 = 90^\circ$ tem-se uma curva senoidal,
- K_n é o número de oscilações;
- s é o comprimento do robô ao longo da curva.

Com isso, pode-se dizer que os ângulos de bloco e junta ao serem aplicados ao fator de curvatura determinam a forma esperada do robô no espaço, conforme mostrado na Figura 13. Quando o ângulo inicial é zero e o comprimento do robô na curva é igual à $N.L$, $k(s) = 0$ e o robô é uma linha reta no espaço.

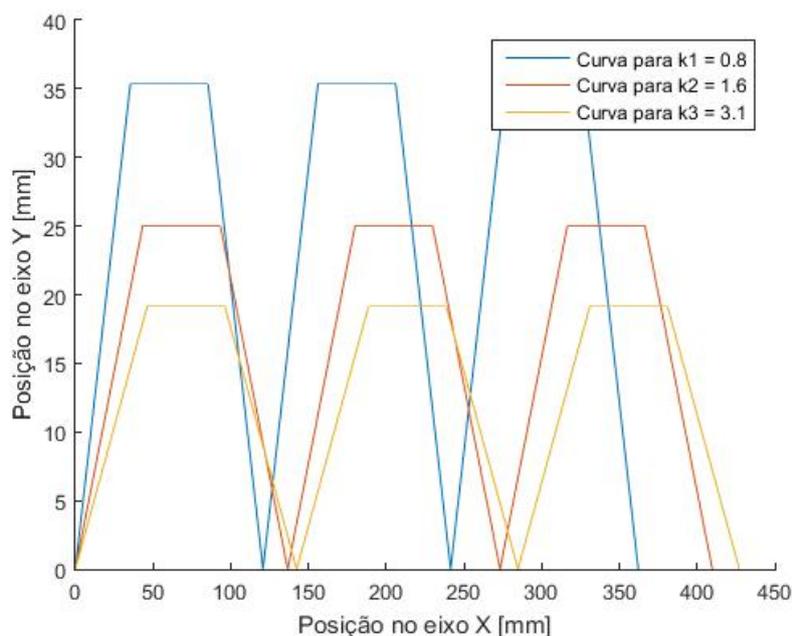


Figura 13: Diferentes formas de curva com diferentes fatores k .

Além de determinar a forma da curva esperadas, os ângulos também podem determinar a orientação geral do robô $\tilde{\alpha}$ em relação às coordenadas globais, onde $\tilde{\alpha} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i$, (HU et al., 2009). A direção teórica é diferente do avanço realizado, mas trata-se de uma informação importante em terrenos desconhecidos, além de trazer um ponto a mais de comparação entre movimento teórico e prático, útil em análises de atrito e controle, pois se o $\tilde{\alpha}$ real apresenta um erro grande em comparação com o teórico, ainda que os ângulos dos blocos estejam sendo executados dentro de suas margens de erro, pode-se sugerir a existência de algum outro fator externo, como inclinação do terreno, que influencie no

posicionamento do robô. Essa análise não será abordada de forma aprofundada neste trabalho, sendo apenas sugerida dentro da rotina de calibragem apresentada no Capítulo 7.

3.2.2 Determinação de Avanço

Tanto a curva serpenoide quanto a serpentoide usam a mesma relação para determinação de um ponto u qualquer na curva, onde $x(s) = \int_0^s \cos(\alpha(u))du$ e $y(s) = \int_0^s \sin(\alpha(u))du$, (MA, 1999). Como pode se perceber, todas as possíveis coordenadas no espaço dimensional estão dentro da linha determinada por s e dependem do ângulo de bloco.

De forma generalizada e já incluindo a questão do atrito, pode-se também pensar no posicionamento dos centros de massa dos módulos individualmente, $mo(x_i, y_i)$, de forma que pode-se escrever a posição global do robô ou de parte dele como $p(x, y) = \frac{1}{Nm} \sum_1^N m(x_i, y_i)$, (LILJEBACK, 2011). O centro de massa também pode ser utilizado na determinação do avanço do robô, fazendo uso de $\tilde{\alpha}$, de forma que $\vec{v} = \dot{p}_x \cos \tilde{\alpha} + \dot{p}_y \sin \tilde{\alpha}$. Deve-se notar que essa seria a forma simplificada da velocidade tangencial do robô, discutida com mais detalhes no trabalho de Liljebäck e suficiente dentro do escopo aqui proposto.

Outra forma de avaliar a velocidade linear do robô é ciclo à ciclo. Nesse caso, $\vec{\delta p} = \delta p(x, y) = p(x(t+T), y(t+T)) - p(x(t), y(t))$, onde T é o tempo total requerido para a execução de um ciclo de movimentação e t é um tempo qualquer, (GOMEZ, 2008). Em tese, como a movimentação cobra é periódica, o robô terá a mesma forma no espaço em t que em $t + T$. Desta relação pode ser determinada a velocidade linear do robô como $\vec{v} = \frac{\vec{\delta p}}{T}$, onde pode-se perceber que a velocidade de avanço aumenta ou por ciclos de movimentação mais curtos ou por maiores passos.

Em qualquer caso, o ponto de referência a ser tomado para se medir o avanço deve ser a cabeça. Em verdade, de acordo com as curvas de movimentação, e com o comportamento do animal, em movimentações linear, concertina e serpentina, todas as partes do corpo da cobra passarão em algum instante t_i pelo mesmo ponto no espaço pelo qual a cabeça passou no instante t_c , tal que $t_c < t_i$.

Algo a se notar é que todos os modelos de avanço apresentados nesta seção consideram apenas movimentação bidimensional no plano (x, y) , o que não cobre com precisão o comportamento denominado *sinus-lifting*, caracterizado pelo levantamento de parte do corpo da cobra durante sua movimentação, visto principalmente durante concertina e serpentina. Esse levantamento está diretamente relacionado à forma como a cobra distribui seu peso durante seu deslocamento, e em geral se dá no ponto médio dos maiores arcos observados na curva do corpo do animal, comportamento reproduzido em robôs cobra, (YAMADA; TAKAOKA; HIROSE, 2013). Como consequência deste levantamento,

o comprimento dos arcos onde este se dá é menor do que o esperado caso o robô estivesse em contato completo com o chão.

3.3 Funcionamento da curva

Até este ponto do capítulo, foi discutida a matemática e modelagem das curvas de movimentação cobra, mas não sobre como o robô as realiza ou o que é necessário para tal, além da execução se uma série de ângulos por meio dos atuadores. Saber como as curvas se aplicam ao caso real é importante ao se pensar na rotina de calibração, enquanto essa deve ser tal que sua realização possa se dar antes ou após de N ciclos de movimentação do robô.

Será aqui considerada a movimentação realizada por um robô que utilize apenas os deslocamentos de seu corpo, excluindo assim o uso de rodas e quaisquer outras estruturas semelhantes.

Supondo a movimentação linear, realizada por uma série de robôs com atuação *pitch-pitch*. O robô começa com comprimento total $N.L$, porém, no momento em que os módulos que o compõem executam o comando de atuação de suas juntas, de forma que $\alpha_i \neq 0$ para todos ou uma parte dos i módulos, o robô passa a ter comprimento s e tem-se o fim da primeira parte de um ciclo de movimentação. O avanço se dá quando um segundo comando de atuação é executado e os i ângulos de bloco se alteram e tem-se um ciclo completo. A questão é que, para que o avanço aconteça, essa alteração de ângulos tem que ser suficiente para que o robô se "empurre" pelo espaço, como indicado na Figura 14.

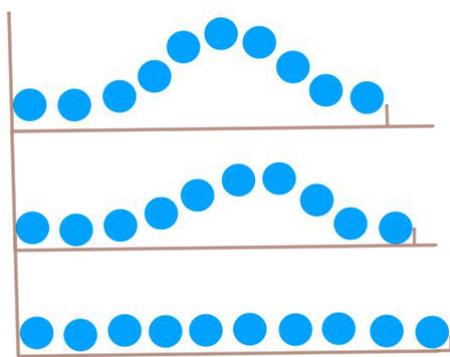


Figura 14: Esquemática de deslocamento usando movimentação pitch-pitch.

Esse ato pode depender de movimentação de módulos específicos à cada ciclo, trazendo uma distribuição de pontos de contato e/ou da distribuição de massa ou de alguma estrutura mecânica no módulo que dificulte o movimento em sentido negativo e o facilite positivamente. Do contrário, pode-se ter uma situação na qual o robô execute os ângulos de movimentação mas seja incapaz de se deslocar pelo ambiente.

Essa distribuição é facilitada no caso *yaw-yaw*, onde o robô pode criar uma situação de "âncoragem" com as dobras de seu corpo, criando assim pontos de maior força normal e atrito, o que dificulta o descolamento desta parte. Assim, enquanto parte do corpo serve como uma âncora, o robô atua o restante de maneira independente, o estendendo em uma dada direção, por exemplo, como indicado na Figura 15. Em cobras, esse processo costuma ser contínuo e acontece durante toda a extensão do corpo o tempo todo, mas em robôs é mais comum que as duas partes (contração e extensão) são feitas em etapas independentes e sequenciais.

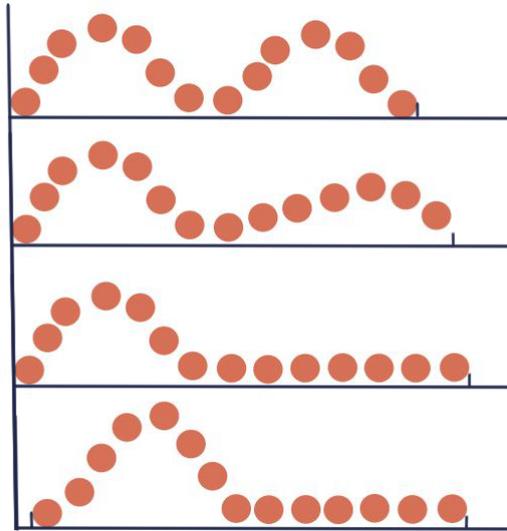


Figura 15: Esquematização de deslocamento usando movimentação *yaw-yaw*. Como pode ser visto

As curvas das Figuras 14 e 15 são similares, sendo as principais diferenças o plano em que atuam e a distribuição de peso durante sua execução. Em ambos os casos, os modelos angulação, determinação de posição e avanço aqui discutidos são suficientes, e costumam ser aplicados ciclo a ciclo ou etapa à etapa. Também podem ser aplicados em partes separadas do corpo à cada iteração, como no caso de n com $n < N$ módulos apenas realizando atuação em suas juntas, como em situação de âncoragem.

Entretanto, ao se pensar na condição de *sinus-lifting*, a qual depende de um robô com atuação *pitch-yaw* seria necessário ou um modelo tridimensional completo ou um que analisasse a movimentação de forma bidimensional fazendo ajustes de posicionamento (x,y) e distribuição de massa de acordo com o ângulo na direção z.

Em qualquer uma das três situações algo torna-se claro: o robô não é capaz de se deslocar pelo espaço enquanto não existir uma estrutura ou condição que dificulte sua movimentação em sentido negativo e lateral ao mesmo tempo que facilite a movimentação em sentido positivo. Um elemento que pode ser decisivo no cumprimento destas limitações em robôs, da mesma forma que o é nos animais, é o fenômeno do atrito, sobretudo quando anisotrópico, e suas peculiaridades, conforme discutido no capítulo seguinte.

4 Atrito

Como visto na Seção 2.1.2, a solução de Hirose para introduzir a condição de impedimento de escorregamento lateral (*side-slip restrain*), elemento essencial na movimentação *pitch-pitch/pitch-yaw* foi a adição de rodas ao longo do corpo do robô em sentido perpendicular à direção de movimento do mesmo. com isso, são determinados dois pontos específicos de contato que mudam a característica de atrito do módulo conforme se muda a direção. Em alguns trabalhos, a solução, mesmo que não-intencional, é o uso exclusivo de movimentação *pitch-pitch*, eliminando preocupações com deslocamento lateral ao torná-lo irrelevante, como era o caso dos módulos vistos na série Ereko, conforme visto na Seção 2.2. Existem também aqueles que adicionam obstáculos e limitações espaciais os quais robô usa de apoio para empurrar-se ao longo do terreno, como discutido em (SANFILIPPO et al., 2017). Neste capítulo, serão apresentadas com mais detalhes as características do atrito que podem levar à tais escolhas, desde as leis básicas, definições de tipo de superfície e parâmetros envolvidos em modelos de atrito.

4.1 Definições de Força de Atrito

Atrito é essencialmente uma relação entre duas superfícies, (HUANG; YANG, 2014). Assim, não há sentido em determinar o atrito "*de um corpo*" em separado, isso seria a rugosidade da superfície do mesmo. Em verdade, o atrito pode ser visto como uma mistura de relações micro e macroscópicas entre duas superfícies, com ou sem lubrificação e que podem ou não se desgastar. O estudo deste ramo recebe o nome de tribologia e em geral é compreendido através da Segunda Lei de Newton, tal que $\vec{F} = m\vec{a} + \vec{F}_f$, onde \vec{F}_f é a força de atrito. Entretanto, existem diversas nuances a serem consideradas.

Discutindo sobre a natureza do atrito, (HSU; YING; ZHAO, 2014) propõem a seguinte ramificação: atrito **Puramente Interfacial** e atrito **Resistência Global ao Movimento**. O primeiro diz respeito a escala nanométrica e o segundo, à macro escala. O que os diferencia é o nível em que ocorre deformação na superfície de estudo - e qual a magnitude desta. Por exemplo, o estudo em micro-escala irá observar as deformações elásticas ou plásticas dos picos das superfícies de contato (os quais definem a rugosidade destas). Enquanto isso, a análise em macro-escala observará a resultante destas deformações na forma de forças de equilíbrio e compensação de trabalho. Sendo o estudo em

macro-escala uma simplificação de um conjunto de forças resultantes, este tende a ser mais facilmente implementado, porém ao custo de perda de informações. Com isso, parte inicial deste trabalho foi determinar qual seria a escala de interesse a ser estudada. Tendo em vista que o objetivo é que o robô seja capaz e realizar as medições sozinho, condições de macro escala serão consideradas suficientes. Ainda sobre o entendimento básico do atrito, (HSU; YING; ZHAO, 2014) descreve as **três leis de atrito seco em macroescala**, as quais resumem a modelagem padrão de atrito, exemplificada na Figura 16, sendo estas:

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

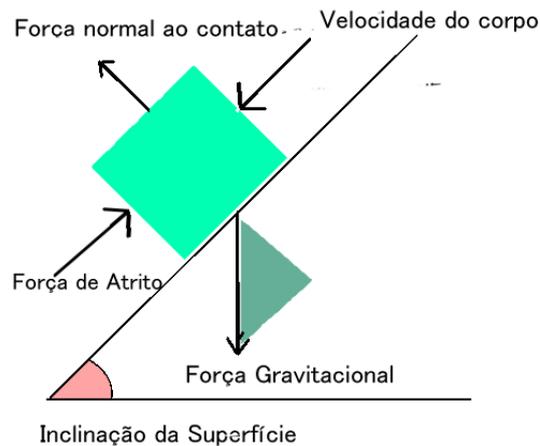


Figura 16: Exemplo de corpo em plano inclinado. Neste caso, todas as relações entre forças podem ser obtidas por trigonometria

Entretanto, após citar as leis, o trabalho segue sobre a questão da noção moderna de atrito e discute sobre os resultados de Tabor *et al.* apresentados em (TABOR, 1981) na atualização da modelagem de atrito. Um primeiro ponto abordado é a mudança da noção do atrito como uma "*resistência ao movimento*" para "*dissipação de energia*". Com isso, a posição do atrito na modelagem muda: ele deixa de ser uma força isolada relacionada apenas à ocorrência ou não do movimento e passa a se associar ao desgaste das superfícies de contato além alterações das mesmas por deformação e dissipação de calor. Um resultado prático é o fato de que a relação da força de atrito seco se dar exclusivamente entre um coeficiente pré-determinado e a força normal entre as superfícies ($\vec{F}_f = \mu \cdot \vec{N}$, de acordo com Coulomb) se torna incompleta, mesmo em macro escala. Claro que tais conclusões devem ser pesadas com cautela, como no caso da irrelevância da dimensão da superfície de contato (segunda lei de Amonton), a qual estudos recentes sobre rugosidade e asperezas superficiais, provam poder ser verdadeira, posto que a área real de contato varia entre

20% e 70% da área visível. Em resumo, mais importante do que os resultados é analisar o que eles implicam no contexto deste trabalho, principalmente para análise de resultados.

4.2 Elementos do Atrito

Entre o início de um ciclo qualquer de movimentação e seu final existem diversas etapas a serem percorridas, principalmente do ponto de vista do fenômeno de atrito, como discutido em (AL-BENDER, 2010). Todas estas podem ser observadas ao se pensar no caso do corpo em plano inclinado da Figura 16. Primeiro, existe a condição **estática** ou de **adesão**, na qual a velocidade relativa entre os corpos em contato é nula. Suponha que esta condição coincida com um ângulo de inclinação $\theta_i = 0$, o que resulta em $\vec{N} = \vec{P}$. Conforme o ângulo aumente em sentido positivo, de forma que $\vec{N} < \vec{P}$, atinge-se um ângulo θ_i tal que o corpo esteja a ponto de iniciar o movimento, mas ainda macroscopicamente estático. Neste ponto tem-se a condição de **ruptura**. Neste caso, ter-se-há um ângulo de ruptura, posto que o movimento se dá pelo aumento da inclinação do ponto, mas em outros casos considera-se uma força de ruptura, (*break-away force*), ou um torque mínimo a ser aplicado num atuador. Esse estado trata-se de um estado de transição, que pode trazer irregularidades nas análises de velocidade ou deslocamento. Uma vez que o ponto de ruptura é ultrapassado, o corpo entra em estado **dinâmico** ou de **escorregamento**, onde $v > 0$, porém não necessariamente em todo instante de tempo t .

Dentro da fase de escorregamento existem três fenômenos que podem ser observados. O primeiro é **adesão e escorregamento** ou *stick-slip*, no qual o corpo sofre uma adesão momentânea à superfície pela qual estava escorregando, que pode resultar num leve salto ou desvio de rota, além de uma mudança inesperada de velocidade e aceleração durante o percurso. Esse fenômeno de adesão-escorregamento se dá pela distribuição irregular dos pontos de rugosidade nas superfícies de contato, e costuma ser mais observado em superfícies mais rugosas ou onde haja presença de impurezas.

O segundo fenômeno é o **pré-escorregamento**, o qual pode ser observado tanto logo após o ponto de ruptura quanto durante toda a fase de escorregamento para deslocamentos curtos. Esse fenômeno gera uma componente de histerese na força de atrito devido principalmente ao micro-escorregamento, sendo histerese um atraso em um efeito esperado devido a mudança das forças que o causam. É como se a força de atrito demorasse a se adaptar às mudanças de velocidade. O terceiro é o escorregamento bruto (*gross sliding*), no qual o comportamento do atrito é diretamente relacionado ao da velocidade, podendo variar quando há variação desta porém mantendo-se constante em pontos sem aceleração.

Todos esses elementos podem ser mais ou menos relevantes dentro de um contexto específico, dependendo do nível de precisão desejado e, para cada um deles, pode existir um meio de mensuração e/ou compensação, de acordo com o modelo de atrito utilizado.

4.3 Sobre Modelos de Atrito

Existem diversos modelos de medição e estimativa de atrito encontrados na literatura, sendo que diferentes modelos foram desenvolvidos com diferentes situações em mente, mas todos tem em comum três características:

- Uso da força de atrito de Coulomb ou de um coeficiente de deflexão (ou os dois);
- Conhecimento ou estimativa da velocidade relativa entre os corpos;
- Não consideração quanto à área total da superfície de contato.

Ou seja, em todos os modelos existe ao menos um coeficiente a ser determinado, deve-se ter algum controle da velocidade e em nenhum teste teórico ou prático há preocupação com a superfície visível, se muito apenas com a quantidade suposta de pontos de contato devido à rugosidade.

Nesta seção serão discutidos alguns dos modelos mais relevantes em robótica, tanto para controle de movimento quanto compensação e controle de juntas. As informações apresentadas são um compilado das informações apresentadas em: (ZEILMANN; GOMES; SOARES, 2010), (DUPONT, 1990) e (CURNIER, 1984).

4.3.1 Modelos Estáticos e Dinâmicos

Os modelos podem ser divididos em duas grandes categorias: estáticos e dinâmicos. Os primeiros costumam ainda trazer a ideia do atrito como uma força de resistência contrária ao movimento, enquanto os segundos o veem como um fenômeno que depende das condições do sistema - e pode alterá-las.

O modelo do atrito seco de Coulomb, mais conhecido, é dado pela fórmula $\vec{F}_C = \mu \cdot \vec{N}$, onde o coeficiente de atrito μ pode ser definido empiricamente porém muda de acordo com a condição do sistema. Se $\vec{v} = 0$, usa-se o coeficiente de atrito estático e para qualquer $\vec{v} > 0$, usa-se o coeficiente dinâmico. Como se pode inferir pela fórmula, esse modelo independe das variações de velocidade, ignorando condições de aceleração e desaceleração ao longo do movimento do corpo sobre a superfície. Ou seja, ele faz, como previsto, uma análise estática da situação. Além disso, o modelo de Coulomb não cobre o caso da existência de uma película fluída no terreno. Esse modelo é referenciado como *modelo padrão de atrito seco*, ou simplesmente *modelo padrão* na literatura. No caso do atrito em ambiente viscoso, a relação é dada entre a velocidade e a força que gera o movimento, $\vec{F}_{viscoso} = \vec{F}_v \cdot \vec{v}$. Apesar da equação considerar a velocidade, ela o faz como uma constante. Uma forma de tornar o modelo mais realista é adicionando o efeito de Stribeck, o qual determina a relação entre o aumento da velocidade de movimento, o sentido do movimento e os efeitos de atrito, de forma que $\vec{F} = \vec{F}_v \cdot |\vec{v}|^{\sigma_v} \cdot \text{sgn}(\vec{v})$.

Apesar de Coulomb e Stribeck não suportarem a condição de $\vec{v} > 0$, a qual se apresenta durante a mudança de direção de um corpo, existem modelos estáticos que o fazem, como **Karnopp e Leine**, comumente aplicados em estudos de válvulas de pressão. Para prever o comportamento do modelo durante todo um ciclo de movimentação ambos, ao invés de considerar o movimento em si, criam vizinhanças de movimentação, as quais se alternam de acordo com o estado do sistema. Leine, por exemplo, define um conjunto de três equações diferenciais ordinárias para: preso, escorregando e transição (*stick, slip, transition*). Seguindo a lógica de aumentar o número de parâmetros a fim de obter um modelo mais fidedigno, surge o **Modelo dos Sete Parâmetros** de Armstrong - o qual também faz diferenciação entre situações de adesão e escorregamento podendo ou não exigir um oitavo termo para a transição, a depender de como for feita a parametrização.

Em suma, para todos os modelos estáticos aqui discutidos deve existir uma definição prévia quanto a qual a condição do corpo (dinâmico ou estático) e há uma preocupação maior com variáveis pré-determinadas do que com condições mutáveis de terreno. De fato, estes modelos costumam ser mais aplicados em sistemas fechados, como de juntas, válvulas e similares, mas não para análise de atrito em um sistema com movimentação cobra com terreno variável e deslocamento. Neste caso, modelos dinâmicos fazem mais sentido.

Modelos de atrito dinâmico costumam depender de elementos dos modelos estáticos, mas adicionam informações a fim de obter resultados mais precisos não apenas com coeficientes, mas pela análise física do modelo e considerando parâmetros que a reflitam. As pesquisas nesta vertente se motivam principalmente pela necessidade de atuadores/servos mais precisos, além da implementação de compensadores de atrito, elemento importante em casos de alta precisão, como braços robóticos cirúrgicos.

O equivalente ao modelo de Coulomb entre os dinâmicos seria o de **Dahl**, desenvolvido com enfoque no atrito entre rolamentos de servos motores. Seu modelo é baseado na curva de tensão-deformação usada no estudo de sólidos com adição de atrito de Coulomb. Dessa forma, ele pode tratar o atrito como uma variável de posição para materiais específicos com coeficientes de dureza conhecidos. Outro modelo base é o de **Cerdas**, com foco no comportamento microscópico, definindo pontos de irregularidade em uma superfície, que funcional como pontos de contato. Assim como Dahl, ele usa o conceito de deformação elástica e considera as N cerdas como molas de resistência σ_0 em um grande sistema semelhante ao massa-mola.

Bliman-Sorine é um modelo que depende apenas da trajetória, dado pela função sinal da velocidade. Entretanto, isso também significa que tal função deve ser obtida. O modelo oferece propostas para tal, parte em forma de equação diferenciais ordinárias, aproximando-o do modelo de Dahl. Pode ser pensado como um *modelo de Dahl para baixas velocidades*. Entretanto, dependendo da modelagem escolhida, o modelo pode negligenciar mudanças de velocidade - ao desconsiderar o efeito de Stribeck - e por vezes comporta-se como um modelo de Coulomb. Também com bases em Dahl, tem-se o modelo de **LuGre**. Ele pode ser visto como uma mistura das Cerdas com efeito de Stribeck - além de con-

siderar a condição de não-movimento. No caso, ele modela a transição entre "estático" e "dinâmico" pela deflexão sofrida pelas cerdas. Todos os modelos tem suas vantagens e desvantagens de acordo com a aplicação necessária e os parâmetros considerados. Ainda que LuGre e Bliman-Sorine baseiem-se em Dahl e possam ter comportamentos aproximados de Coulomb, eles não são iguais. Um bom exemplo para compreensão é a questão da dissipação - propriedade relevante em modelos de atrito. O modelo de Bliman-Sorine é dissipativo em qualquer circunstância, enquanto o de LuGre só o é para uma condição de amortecimento mínimo. Uma análise mais detalhada dos modelos de Dahl, cerdas e LuGre, com suas equações e exemplos numéricos são apresentados no Capítulo 5.

4.4 Medição de Atrito

A maioria dos testes para determinação de atrito são feitos em situações estáticas, com uso de maquinário a fim de se obter um coeficiente de atrito pontual. Neste caso, *estático* significa apenas que todas as forças consideradas em modelagem são externas ao elemento analisado, como a força de atração gravitacional, e não que a velocidade do corpo é nula durante todo o experimento. Em seu trabalho, (MARCO; TRINDADE, 2011), Nelson Marco Trindade fez um apanhado dos modelos de medição mais comuns. No geral, temos três tipos de testes:

- Por variação de ângulo de inclinação;
- Por força dissipada;
- Por balanço de energia.

Há um outro método possível, que não requer situação de escorregamento, analisado em (REINA et al., 2010). Neste caso, o que se faz é considerar condições de escorregamento parciais entre corpos sem um deslocamento completo. A justificativa deste método é que causa menos dano às superfícies de contato, garantindo portanto uma melhor caracterização da rugosidade e comportamento mecânico das mesmas - excluindo modificações causadas pelo teste em si. As definições são feitas por análise de *fretting* por fadiga. Entretanto, como este método envolve maquinário específico e a análise foca na rugosidade, ele será aqui desconsiderado.

Um exemplo clássico de testes de ângulo é o teste de plano inclinado, como mostrado na Figura 16, onde a estimativa dos coeficientes de atrito - estático e dinâmico - é feita de acordo com variações do grau de inclinação θ da superfície de contato. A maior vantagem deste teste é que depende apenas no ângulo de inclinação para fornecer uma estimativa do coeficiente de atrito, ignorando especificidades de material ou valor de forças externas e internas. Entretanto, isso também indica que ele ignora a massa do objeto, tende a ser impreciso em ângulo baixos e só é aplicável em superfícies lisas, posto que a

inclinação da superfície pode alterar as características do terreno, como deslocamento de granulados ou escoamento de fluido viscoso. De todo modo, esta técnica permite um certo nível de análise de interação entre materiais e de comportamento de estruturas e permite coleta de dados usados na formulação de tabelas e manuais.

Como visto na Seção 4.1, é comum pensar na força de atrito como um elemento de resistência, ou no caso, como a *força mínima necessária que deve ser exercida sobre um corpo para que este entre em movimento*. Assim, se for possível medir esta força mínima e a relacionar com o coeficiente que a determina, é possível calcular o atrito em quaisquer situações. As medidas desta força são realizadas por *tribômetros* ou sensores de força aliados a acelerômetros, com os quais é possível fazer um perfil de variação da força de atrito em acordo com parâmetros de escorregamento e com uma das características mais importantes do atrito: a dissipatividade.

Esfregar duas superfícies em certa velocidade gera resíduo térmico e sonoro e, quanto mais rugosas e rígidas as superfícies, maior os níveis de ruído e temperatura. Assim, voltando ao conceito do atrito existente apenas na condição de escorregamento relativo entre duas superfícies, é possível concluir que a força de atrito pode ser determinada pela dissipação de energia em um dado deslocamento conhecido, de modo que $W_a = \int F_a \cdot dx$, onde W_a é o trabalho equivalente à dissipação e F_a a força de atrito considerada durante o deslocamento x . Em (MARCO; TRINDADE, 2011), essa relação é usada no desenvolvimento de um tribômetro com base em um pêndulo horizontal incluso em sistema massa-mola amortecido. Em suma, o atrito é estimado com base na dissipação de energia do sistema, observável pela mudança de amplitude do pêndulo. Trata-se de um modelo de compensação entre o momento de inércia do corpo em movimento e o atrito que este sofre ao estar em contato com uma superfície qualquer, onde $\sum 2F_a \cdot r = I\ddot{\theta}$.

Algo comum a todos os sistemas descritos nesta seção é a necessidade de um maquinário ou elemento externo ao corpo para realizar a medição. O caso mais simples seria o de dissipação de energia, posto que este se manifesta em outros aspectos do movimento, como deslocamento real, velocidade e aceleração, principalmente tendo em vista as diferentes etapas de adesão, escorregamento e pontos intermediários observáveis durante um ciclo. Assim, usar a dissipatividade é um caminho plausível na implementação da rotina de calibragem - com a ressalva que, assim como nos outros métodos, o que se tem é uma estimativa de força responsável pela distância entre a teoria e o experimento, a qual passa a ser atribuída ao atrito.

4.5 Atrito Nas Cobras

Uma vez ciente do que é o atrito, como ele pode ser modelado e medido, sobra a questão de como ele funciona no caso das cobras. Na Seção 2.1 discutiu-se brevemente sobre como as cobras usam suas escamas e o terreno para se locomoverem. Agora, esses

aspectos serão aprofundados.

4.5.1 Escamas Biológicas

As escamas são uma característica de fácil associação às cobras, sendo uma estrutura que recobre basicamente toda sua pele. As escamas possuem papel de identificação na literatura biológica, como discutido em (SILVA; BOCHNER; GIMÉNEZ, 2011), sendo que estas costumam ser *lisas* em animais não peçonhentos e *ásperas* em peçonhentos. Essas generalizações não são necessariamente corretas em todos os casos, como a cobra-coral verdadeira -peçonhenta-, que possui escamas lisas, e a avaliação deste fato traz uma informação relevante: o quanto da característica das escamas diz sobre os locais pelos quais o animal costuma viver e se por onde precisa se deslocar. Por exemplo, também é usado como exemplo dos equívocos da literatura as cobras-da-água, as quais possuem escamas ásperas mesmo sem veneno, entretanto tal fato é explicável pelo terreno no qual vivem, e no qual se movimentam *empurrando* seu corpo contra a resistência da água, o que exige um atrito superficial maior.

Mesmo ao longo de um único animal, pode-se perceber diferentes características nas escamas em partes particulares do corpo. Conforme visto em (BERTHÉ et al., 2009), onde se analisou a estrutura superficial de uma *Corallus hortulanus* (Cobra-verdadeira), é possível perceber mudanças de tamanho médio e rugosidade em escamas de acordo com a posição destas na cobra. As três principais posições consideradas na literatura são: dorsal, lateral e ventral. Parte da variação de tamanho também envolve uma variação de geometria, como pode ser visto na Figura 17, onde as escamas da cabeça são mais arredondadas e irregulares entre si, com variações de tamanho e contorno para acompanhar o crânio, as laterais tem contorno de diamante e apresentam mais heterogenia, e as ventrais possuem comprimento lateral maior do que longitudinal com leve curvatura na parte central.

No artigo (HU et al., 2009), é apresentada uma extensa discussão sobre a mecânica da movimentação serpentina nas cobras, com enfoque na relevância das escamas nesses, principalmente como contra-argumentação aos estudos anteriores que baseavam a movimentação cobra exclusivamente na capacidade do animal de empurrar-se contra obstáculos e irregularidades do solo, deixando as escamas em segundo plano. No trabalho, são considerados dois atritos: f_{fric} , ou atrito por unidade de comprimento, e f_{int} , que seria a resultante das forças internas, geradas pela própria cobra, sendo simplificada para a força necessária para que a cobra contorça seu corpo durante a movimentação.

De fato, como discutido na Seção 2.1, as escamas são elemento de alta importância na movimentação, mas para reprodução de movimentação cobra aqui considerada não é necessário estudar as características de todos as três classes. O ponto de interesse são as escamas ventrais, posto que ficam em maior contato com o terreno pelo qual o animal se movimenta, sendo mais relevantes no estudo de movimentação. Como também pode ser



Figura 17: Exemplo de diferentes escamas em uma cobra *Naja nigricollis*. Fonte: Warren Klein via Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0

visto na Figura 17, estas escamas apresentam geometria base similar à um semi-círculo com arco na direção oposta à do movimento, padrão nas cobras. Ressalta-se que neste trabalho será considerada a morfologia de cobras terrestres, excluindo as aquáticas porém considerando as de natureza comumente associada à árvores, como a *Boa constrictor* (Jibóia), posto que as regras gerais de estrutura de escamas são aplicáveis neste nicho.

4.5.2 Anisotropia no Atrito

A anisotropia é uma solução comum na natureza, desde estruturas cristalinas micro-moleculares até as placas tectônicas,(FILIPPOV; GORB, 2013). E, enquanto solução comum, é possível perceber padrões que a envolvem, como o fato de que objetos de estudo com anisotrópica podem ter suas superfícies de contato separadas em duas camadas: uma de apoio e outra composta por um conjunto de elementos, normalmente irregulares, responsáveis pela anisotropia. No caso das cobras, essas camadas seriam a pele e as escamas, respectivamente. Em seu trabalho, Filippov conclui que a anisotropia é melhor reproduzida quando as juntas entre as camadas têm rigidez intermediária, ou seja, a camada-base maleável e a camada irregular rígida - um resultado facilmente alcançado evolutivamente porém ainda sem reprodução ideal feita por meios humanos.

Além da reprodução de anisotropia, tem-se a questão da estimativa desta. Como dito na Seção 2.1, uma superfície anisotrópica tem coeficientes de atrito diferentes para orientações diferentes e, no caso das cobras, as escamas ventrais apresentam três níveis de atrito, (MARVI et al., 2016), sendo que:

- O coeficiente mais baixo é observado no sentido longitudinal positivo (paralelo ao

corpo com orientação relativa ao movimento frontal);

- O sentido lateral (perpendicular ao corpo, independente da direção) apresenta um atrito médio;
- O sentido longitudinal negativo (paralelo ao corpo com orientação contrário ao movimento), apresenta o maior valor de atrito.

De acordo com (TAPIA; TOURNEAU; GÉMINARD, 2016), para situações anisotrópicas, um dos melhores jeitos de analisar o atrito é dividi-lo em duas componentes, uma tangencial à direção de movimento \vec{F}_t e outra normal à esta, \vec{F}_n , as quais devem *necessariamente* ser diferentes. Em seu trabalho, Tapia *et al.* conclui que \vec{F}_n não contribui à dissipação no balanço energético devido à sua magnitude. Entretanto, tal afirmação depende da hipótese de que as partes extensivas (segunda camada) responsáveis pela diferença de atrito direcional são absolutamente inelásticas, um ponto aceitável no objetivo de estudo ali em questão (prerrogativa da direção de trincas de falha devido a atrito entre superfícies) o que não é necessariamente verdade para todos os materiais e configurações estruturais.

Uma abordagem possível para o caso da anisotropia no atrito dinâmico de um robô com movimentação cobra é diferenciar os movimentos dos módulos individuais e o movimento do robô, tendo em vista os elementos discutidos no Capítulo 3. Ou seja, ainda que o robô se mova "para frente", que seria o sentido longitudinal da superfície, esse movimento é uma resultante do deslocamento dos módulos individuais, exemplificada na Figura 18.

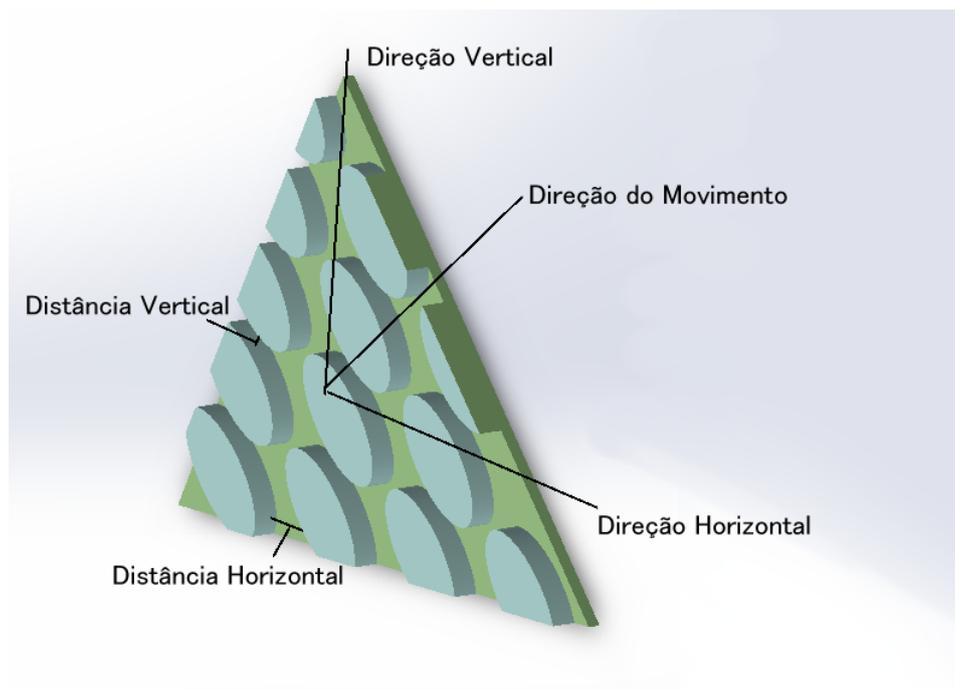


Figura 18: Superfície anisotrópica com direções Vertical e Horizontal heterogêneas

Com isso, a análise do atrito fica dependente de um coeficiente μ resultante, dado apenas pela condição de movimento (adesão, escorregamento e intermediários) e não pela característica de superfície, desconsiderando a decomposição tangencial e normal do atrito. Tal afirmação é feita seguindo a hipótese de que a superfície anisotrópica é *suficiente* para realização do movimento cobra, mas que o conhecimento das características individuais referentes às superfícies de contato não é *necessário* para se aplicar os modelos de atrito discutidos neste capítulo.

4.5.3 Movimentação Cobra

Uma revisão bibliográfica por estudos de movimentação cobra inevitavelmente esbarra na discussão sobre a necessidade ou não da implementação de atrito anisotrópicos nos protótipos, considerando que já pode-se dizer atualmente que o atrito, independentemente, é importante, como concluído no Capítulo 2. Afinal, para se inserir a anisotropia é preciso fazer alterações na superfície do robô ou de seus componentes, como no caso da adição de rodas, (YAMADA; TAKAOKA; HIROSE, 2013). Sendo inevitável que a adição de mais um aspecto no projeto aumente seus gastos de manufatura e manutenção, além de ser um elemento a mais a ser considerado na modelagem do movimento, seu uso torna-se uma discussão de custo-benefício, o qual aqui é feito com base na literatura.

Em 2002, (GRABEC, 2002), foi aplicado um sistema de atrito anisotrópico em um robô cobra simulado computacionalmente. Seu artigo conclui que o atrito é antes uma variável problemática do que vantajosa, tendo em vista os parâmetros extras que exige e o pouco efeito que estes trouxeram ao fim de um ciclo de movimentação linear. Entretanto, o movimento linear, o qual dependeu no trabalho apenas de movimentação *Pitch-Pitch*, de fato não é afetado pela anisotropia, posto que tanto os elementos individuais quanto o robô em si não apresentam movimentação lateral, em estilo similar aos robôs da série Ereko, como discutido na Seção 2.2.

Em 2008, (TRANSETH et al., 2008), tem-se um estudo que amplia as possibilidades de movimentação para outras configurações (*pitch-yaw*) e outros terrenos - particularmente desmoronamentos- com condição de obstáculos. Com enfoque em simulação 3D, é aplicado um sistema anisotrópico com base no modelo de atrito seco de Coulomb além de se considerar controle das juntas ao longo do robô. Ao fim, o trabalho demonstra que o uso de parâmetros de consideração no atrito de fato aumenta os custos computacionais e matemáticos, mas também afeta diretamente o desempenho do robô.

Em 2015, (SERRANO et al., 2015), tem-se uma breve revisão de robótica cobra, alegando que o atrito é uma questão redundante porém incompleta, mesmo com quase 30 anos de desenvolvimento (considerando o início em Hirose com (HIROSE; MORI,)). Em suma, o atrito acabando sendo ignorado ou removido ao se limitar o estilo de movimentação, tendo-se apenas que buscar um "atrito suficiente para existência do movimento linear". Ressalta-se a importância do atrito no âmbito de desenvolvimento de robôs cobra

mais eficiente e propõe estruturas feitas em prototipagem capazes de simular a configuração das escamas do animal.

Escolheu-se esses três trabalhos para analisar a anisotropia na literatura posto que os três tem pontos de vista, objetivos e metodologias diferentes, porém sempre com foque nos resultados de um sistema onde a anisotropia é um fator diferencial. Assim, uma revisão destes é uma forma objetiva de se obter uma visão ampla e indiscriminada quanto ao assunto. Entretanto, outros estudos foram considerados para a decisão final de que a aplicação da anisotropia em um robô cobra é de fato útil e necessária, todos citados em diferentes pontos deste trabalho.

5 Modelos de Atrito Utilizados

Ao se aplicar um modelo de atrito à movimentação, é possível prever valores da força de atrito ao longo do percurso a ser percorrido. Entretanto, como visto na Seção 4.3, todos os modelos possuem parâmetros que devem ser obtidos de diferentes formas tendo em mente o objetivo final, (OLSSON, 1996). Serão aqui apresentados três modelos de atrito dinâmico unidimensional (Dahl, Cerdas e LuGre) os quais podem ser aplicados no processo de calibragem de atrito.

Foram selecionados apenas modelos de atrito dinâmico por suportarem mudança de sentido de velocidade sem descontinuidade matemática, conforme discutido no Capítulo 4. Além disso, os três modelos aqui discutidos foram escolhidos por seus dados de entrada e saída, pontos que determinam a viabilidade de sua aplicação dentro da rotina de calibragem desejada e as informações obteníveis por seu uso. O custo computacional deles não foi um limitante inicial, porém foi analisada a complexidade numérica e física destes antes de os aplicar.

Todos os três modelos foram reproduzidos em *software* Matlab, tal que os códigos referentes foram escritos usando dados e definições dos artigos nos quais foram apresentados além de trabalhos que os referenciam encontrados na literatura. Todos os gráficos apresentados neste capítulo foram criados usando os códigos dos respectivos modelos também com uso do Matlab.

5.1 Modelo de Dahl

O modelo de Dahl, considerado como uma extensão do modelo de Coulomb, trata-se de uma aproximação não-linear do comportamento da superfície de contato quanto submetida a uma situação de atrito baseada na curva de tensão mecânica dos sólidos, onde a fase elástica equivale ao **atrito estático** e a plástica, ou pós-ruptura, ao **dinâmico**. Tal comparação advém da existência de "micro-deslocamentos", outro nome para o fenômeno de pré-escorregamento, (AL-BENDER; SWEVERS, 2008), onde a força de atrito observada entre as superfícies de interesse ainda é superior à força de ruptura do movimento e percebe-se um certo nível de deformação nas superfícies de contato mesmo sem um deslocamento relativo observável na escala macroscópica, (DAHL, 1968).

Esse modelo foi desenvolvido para simulação de sistemas de controle onde a compensação ou o controle de atrito se faz necessário, sobretudo em atuadores/servos motores e juntas, para fins de precisão de movimento.

Em Dahl, a força de atrito é modelada como sendo função apenas do deslocamento e do sentido da velocidade e, graças a essa abordagem, apresenta continuidade em função do tempo, eliminando a descontinuidade matemática que ocorre durante a mudança de direção de movimento vista no modelo de Coulomb. Deve-se manter em mente que o modelo de Dahl não suporta efeitos viscosos nem casos de adesão-escorregamento no meio do ciclo de movimentação, apenas o deslocamento total.

5.1.1 Obtenção dos Parâmetros de Dahl

O modelo de Dahl é dado por $\frac{dF_d}{dx} = \sigma_d(1 - \frac{F_d}{F_c} \text{sgn}(v))$, (GARCÍA-BAÑOS; IKHOUANE,). Nesse caso, tem-se que σ_d , característica do sistema comparável à tensão de escoamento numa curva tensão/deformação, e o atrito de Coulomb, F_c , são parâmetros desconhecidos. A obtenção de σ_d e F_c dentro do problema é um dos maiores desafios na aplicação deste modelo. O método de identificação aqui descrito é baseado no desenvolvido em (GARCÍA-BAÑOS; IKHOUANE,), que faz uso do modelo no domínio do tempo e se dá nos seguintes passos:

- Determinação do deslocamento x , o qual será um parâmetro de entrada. x deve ser contínuo e descrito por função diferenciável e periódica
- Determinação do Parâmetro F_c para velocidade \vec{v} , descrita por \dot{x} , constante, sendo $F_c = \lim_{x \rightarrow \infty} F_d(t)$
- Determinação de variável $w(t)$ tal que $w(t) = \frac{F(t)}{F_c}$
- Caracterização do loop de histerese, ou identificação do parâmetro ρ , tal que $\rho = \frac{\sigma_d}{F_c}$

Foi realizada uma rotina no software *matlab* para reprodução do artigo e familiarização com o método, usando os dados de entrada fornecidos no mesmo e um solucionador de EDO padrão do *matlab* para obter a variável $w(t)$ com $\dot{w}(t) = \rho(\dot{x}(t) - |x(t)|w(t))$. O resultado é uma relação entre a força de atrito em função do tempo durante um deslocamento x , conforme mostrado na Figura 19.

Em ambas iterações da força de atrito foi usado $F_c = 1$. Na primeira, o deslocamento x_1 foi posto como uma equação linear tal que $x_1 = t_1$ para qualquer ponto no tempo. De fato, a primeira iteração mostra um aumento da força de atrito de zero até o valor da Força de Coulomb. Na segunda iteração, foi considerado um deslocamento periódico no tempo com mudança de direção, onde $x_2 = -\cos(t_1)$. Assim, a Força de atrito segue também um padrão periódico ao longo do tempo, com exceção do início do movimento, $t < 10$, onde a força de atrito tem um pico de maior amplitude em relação

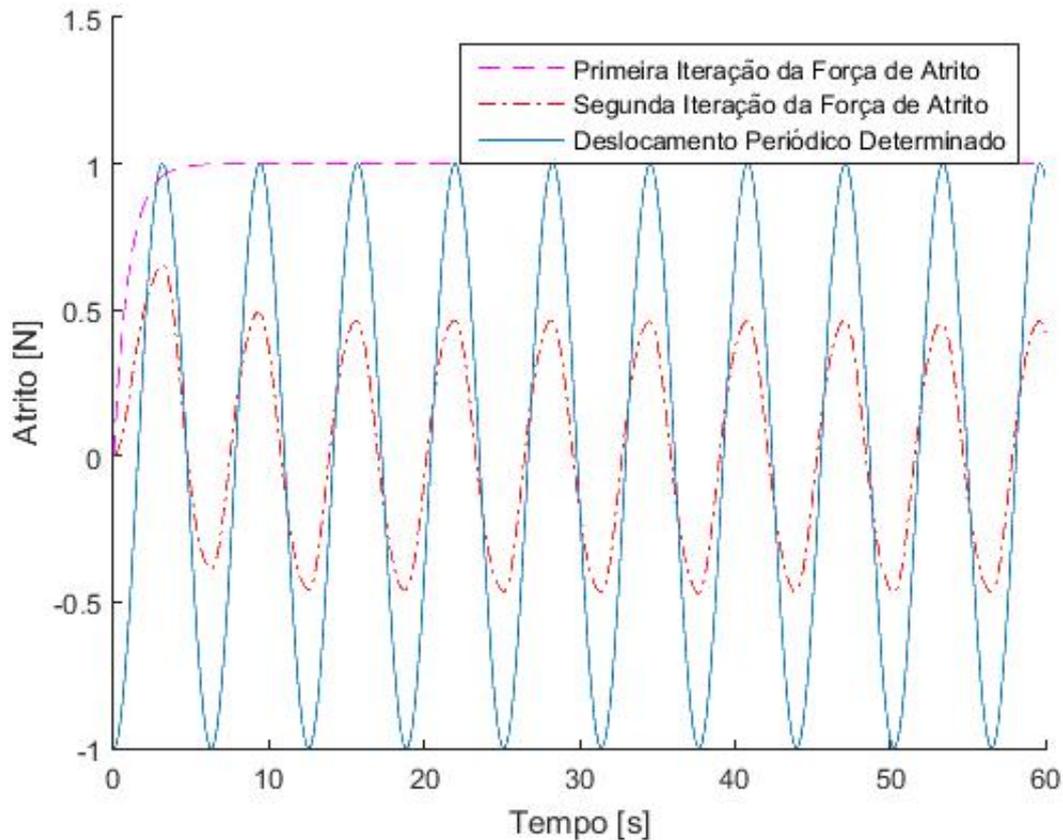


Figura 19: Exemplo numérico de Dahl usando os dados apresentados em (GARCÍA-BAÑOS; IKHOUANE,)

ao restante do tempo. Esse pico se explica pelas condições de transição (força de ruptura, adesão) entre o estado estático e dinâmico consideradas no modelo. A falta de outros picos ao longo do tempo se dá pelo fato deste ser um modelo numérico teórico. Algo a se notar é que em todos os instantes a força de atrito de Dahl foi tal que $F_d < F_c$, comportamento que se repete para quaisquer valores de F_c .

5.1.2 Aplicação do modelo de Dahl

Como visto, os parâmetros de entrada na solução do modelo de Dahl são a velocidade, o deslocamento total e tempo decorrido entre início e fim do ciclo de movimentação. Assim sendo, a lógica aplicada na rotina de calibragem seria:

- Realizar um deslocamento pré-determinado de natureza periódica mantendo-se a velocidade dos atuadores constante
- Anotar a diferença entre o deslocamento teórico e o real em termos de tempo, velocidade e ponto final do ciclo
- Determinar força de Coulomb F_c

- Rodar o programa para determinar o $F(t)$ dado pelo modelo de Dahl
- Realizar um novo ciclo de movimentação para comparação
- Verificar se a força de atrito estimada pelo programa se aproxima do resultado real no último ciclo realizado

Com isso, seria possível obter uma relação direta entre um deslocamento $x(t)$ periódico qualquer e a influência da força de atrito durante o mesmo. Como o modelo depende apenas da velocidade do deslocamento ser mantida constante e da capacidade de se obter o deslocamento real realizado, a calibragem poderia ser refeita em diferentes terrenos sem a necessidade de inserção de novos parâmetros. A maior dificuldade seria a correção do atrito de Coulomb, mas a obtenção deste será discutida no Capítulo 10.

5.2 Modelo de Cerdas

De forte inspiração física, o modelo de cerdas baseia-se na visualização das rugosidades entre as superfícies de contato como várias cerdas, como em uma escova, onde cada uma contribui para o valor total da força de atrito por meio de resistência à deflexão, (HAESSIG; FRIEDLAND, 1990). As cerdas formam pontos de contato e adesão entre as superfícies de contato, e sofrem deflexão com o deslocamento relativo entre estas e quando a deflexão atinge um certo nível, os contatos são rompidos. Fazendo paralelo com a Seção 4.1 a fase pré-ruptura dos pontos de contato seria a fase de adesão e a pós-ruptura, escorregamento. Essa definição de ponto de ruptura, indicado por uma deflexão σ_e , é similar ao paralelo feito em Dahl com estados de deformação elástica e plástica, mas a existência das ditas "cerdas" define as diferenças entre os dois modelos.

As cerdas não são exatamente proporcionais à rugosidade, sendo muito mais uma condição que surge devido à movimentação relativa entre as superfícies de contato do que uma propriedade mecânica isolada. Inclusive, o número de cerdas pode ser entendido como uma função da velocidade relativa entre as superfícies, de forma que para velocidades baixas o número de cerdas, e consequentemente a resistência ao movimento, é maior, estando em acordo com o efeito de Stribeck, desconsiderado em Dahl. Além disso, ao focar o problema apenas no comportamento das cerdas, as quais podem ser observadas como molas num sistema com um corpo de massa, este modelo diminui sua dependência da força de atrito de Coulomb, mas deve-se perceber que isso não significa que ele independa de parâmetros prévios, como a localização dos pontos de contato.

Parte da essência do modelo é o fato dos pontos de contato não serem fixos: cada vez que um deles se rompe devido à condição de escorregamento, novos pontos são formados em locais aleatórios em torno de um raio definido. Com isso, as condições que determinam a força de atrito resultante do modelo mudam ao longo do deslocamento e do tempo decorrido a cada ciclo de iteração determinado. Essa lógica foi desenvolvida de forma

tentar simular o atrito tanto no período de pré-escorregamento quanto de escorregamento, (AL-BENDER; SWEVERS, 2008), além de pontos de adesão-escorregamento, (HAESSIG; FRIEDLAND, 1990).

Em verdade, por se basear em múltiplas iterações com computação de novos resultados com base não só nos dados de entrada como nos dados acumulados a cada *loop*, o modelo de cerdas tem alta carga computacional requerida quando comparado à outros modelos como Dahl e Karnopp, o que pode se tornar um problema ao considerar um sistema embarcado no robô. Entretanto, isso é uma consequência inevitável de sua formulação e já foi reconhecido pelos idealizadores do modelo, tanto que no mesmo artigo onde Cerdas é apresentado existe um outro modelo: (*Reset Integrator Model*) ou RIM, focado na redução do tempo computacional gasto. Contudo, como RIM define parâmetros de forma diferente de Cerdas, será discutido à parte na Seção 5.2.2.

Devido em parte à sua abrangência e à simplicidade do modelo de (HAESSIG; FRIEDLAND, 1990), existem outros modelos baseados em cerdas, em geral chamados de "modelos estendidos", os quais fornecem modelos de atrito bidimensional, (LIANG; FILLMORE; MA, 2012), (MA; LIANG; FILLMORE, 2009), com bons resultados de precisão e simulação de atrito em casos com vários pontos de contato ocorrendo simultaneamente. Entretanto, esse tipo de modelo depende da separação das variáveis entre estáticas e dinâmicas, o que gera dois modos (adesão e escorregamento) dentro do mesmo modelo além de exigir uma deflexão tridimensional das cerdas, ambos fatores que aumentam não só a carga computacional mesmo usando Cerdas Integradas (derivado de RIM) como a complexidade da modelagem do problema. Assim, apesar de serem interessantes para estudos futuros, os modelos estendidos fogem ao escopo deste trabalho, não sendo necessários para a rotina de calibragem que aqui se deseja determinar.

5.2.1 Parâmetros do modelo

O modelo define a força de atrito como um resultado da posição das cerdas, de forma que $F = K(s_i - b_i)$ onde:

- A deflexão individual das cerdas é denotada por σ_b . Quando $\sigma_b > \sigma_e$, sendo σ_e a deflexão de ruptura ou escorregamento, tem-se início a fase de escorregamento;
- K é uma propriedade das cerdas, dado pela razão entre a força de atrito máxima esperada e a deflexão das cerdas, $K = F_{m\acute{a}x}/\sigma_b$ onde o atrito máximo pode ser aproximado para o atrito estático seco de Coulomb. Seria comparável à resistência mecânica da mola;
- s_i é a posição relativa entre as superfícies de contato, a qual é um dado de entrada que se altera nas iterações em função da velocidade;

- b_i é a localização da cerda. O modelo considera que após o ponto de ruptura, as cerdas, ou os pontos de contato entre as superfícies, mudam de lugar, tal que $b_{i+1} = b_i + \text{sgn}(\sigma_b) \cdot \text{uniform}(\delta_r)$, sendo sgn a função sinal e uniform uma característica probabilística quanto à distribuição de novas cerdas;
- δ_r define o raio para aparição de novos pontos de contato b_i e deve permitir o escorregamento do corpo. Assim, δ_r deve ser tal que $F_r = K(\sigma_e - \frac{\delta_r}{3}) > F_e$, onde F_e é a força de atrito durante o escorregamento.

O modelo baseia-se em um loop controlado pelo número N de cerdas teóricas desejadas, a qual é dada em função da velocidade relativa entre as superfícies. Foi feita uma rotina em *matlab* para fins de familiarização e compreensão do modelo. Com isso, tem-se por dados de entrada a velocidade relativa entre duas superfícies. A velocidade é utilizada para alterar o valor da posição relativa s_i entre as superfícies de contato, adicionando uma relação direta entre a força de atrito e o tempo decorrido. Porém, esse modelo exige outras correções ao longo de um deslocamento.

Como pode ser visto na Figura 20, apesar do deslocamento a velocidade constante e da alteração contínua do ponto de cerdas, a força de atrito atinge um máximo após o ponto de ruptura e mantém o mesmo valor ao longo de todo o tempo, em comportamento semelhante ao modelo de Dahl para um ciclo. Entretanto, de acordo com a maneira como o modelo de cerdas é formulado, esse comportamento não faz sentido físico, posto que o ponto de pico equivale ao atrito de adesão e, conseqüentemente, não se obtêm informação quanto ao atrito de escorregamento.

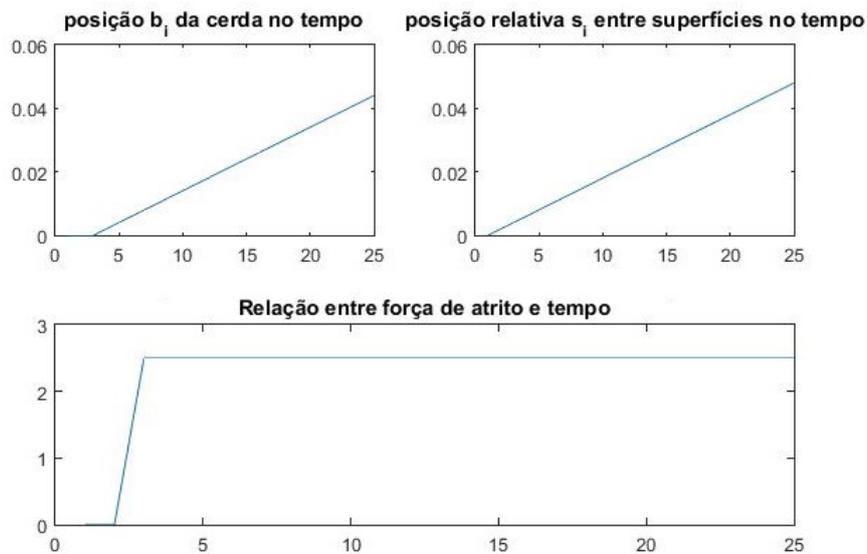


Figura 20: Exemplo numérico do modelo de Cerdas sem correção, usando dados fornecidos em (HAESSIG; FRIEDLAND, 1990)

Enquanto Dahl tem um ponto de pico que representa a mudança de direção, na qual tem-se o atrito de adesão, o valor da força decai conforme o deslocamento e conforme

a velocidade do sistema, em comportamento condizente com a fase de escorregamento. Mesmo quando o atrito segue no seu valor de pico, sabe-se já que esse é o atrito de escorregamento ou dinâmico, e sua continuidade independe de quaisquer fatores além do movimento relativo entre as superfícies. Entretanto, para o mesmo comportamento - o qual de fato aparece em (HAESSIG; FRIEDLAND, 1990)- seja observado, algumas mudanças de caráter arbitrário devem ser feitas na rotina matlab, inclusive para que o modelo faça sentido dentro da rotina de calibragem. Assim, a deflexão σ_b foi redefinida como sendo uma razão entre a força de atrito e a resistência ao movimento da cerda, seguindo a Lei de Hooke. Com isso, pode-se observar um ponto de queda da força de atrito devido a transição entre fase de adesão e de escorregamento, Figura 21.

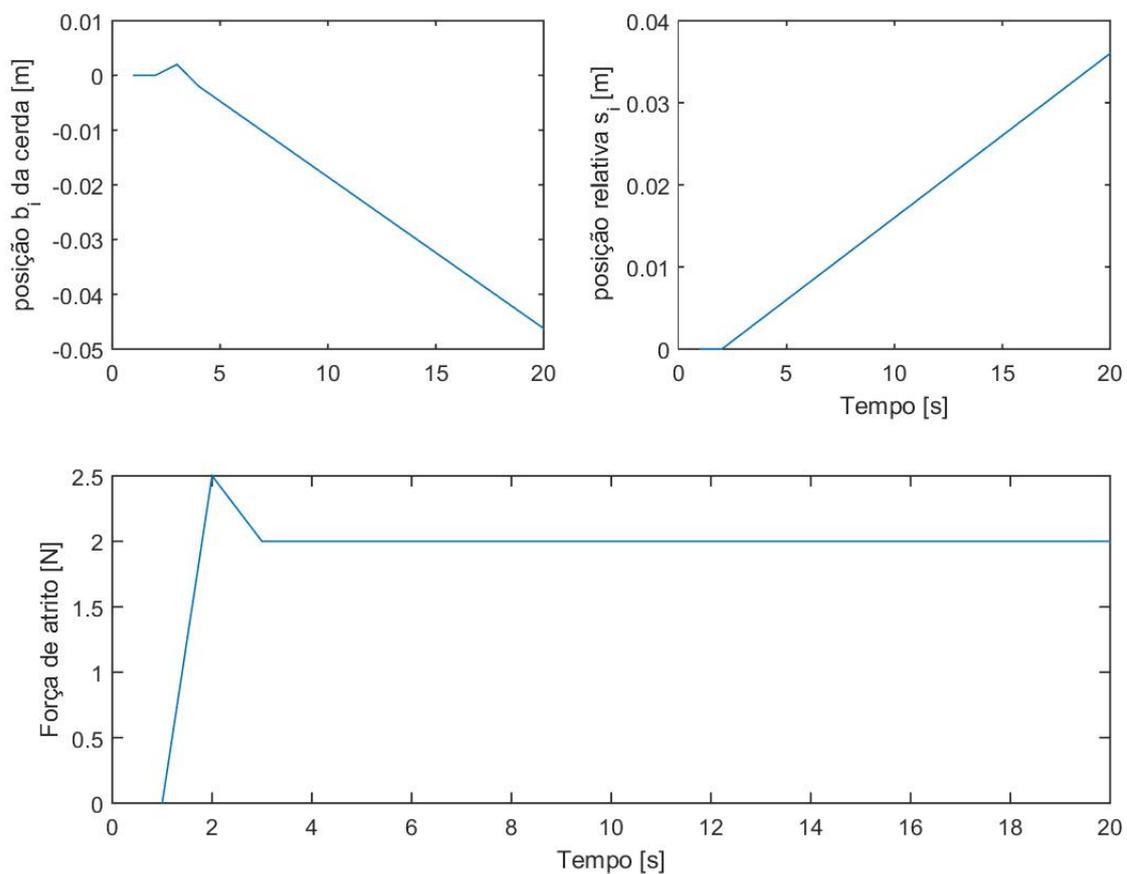


Figura 21: Exemplo numérico do modelo de Cerdas com correção, usando dados fornecidos em (HAESSIG; FRIEDLAND, 1990)

Nesse caso, a força de atrito cai, entretanto o modelo depende de um conhecimento prévio da força de atrito de escorregamento para computar a curva de comportamento. De fato, o exemplo mostrado no artigo original e em outros artigos os quais nele se inspiram, dependem fortemente ou da posse dos coeficientes de atrito ou das forças de atrito já esperadas, servindo mais como correção e validação do que como obtenção de dados. Tais conclusões não são inesperadas, sendo compatíveis com a natureza computacional do modelo. Outro ponto a ser considerado é que os exemplos na literatura consideram

movimentações lineares onde a posição s_i segue sempre em orientação positiva. Mesmo no caso de um bloco caindo em plano com inclinação bi-dimensional, (LIANG; FILLMORE; MA, 2012), o módulo da posição ainda segue aumentando, mesmo de forma não linear ou constante. Com isso, um ciclo de movimentação completa, conforme descrito em 7 teria que envolver uma iteração completa para cada mudança de sentido. Além disso, como a força de atrito depende diretamente da deflexão, ou da diferença entre s_i e b_i , porém a posição das cerdas independe do estilo de curva de movimentação observada no deslocamento, podendo gerar resultados incoerentes, como visto na Figura 22.

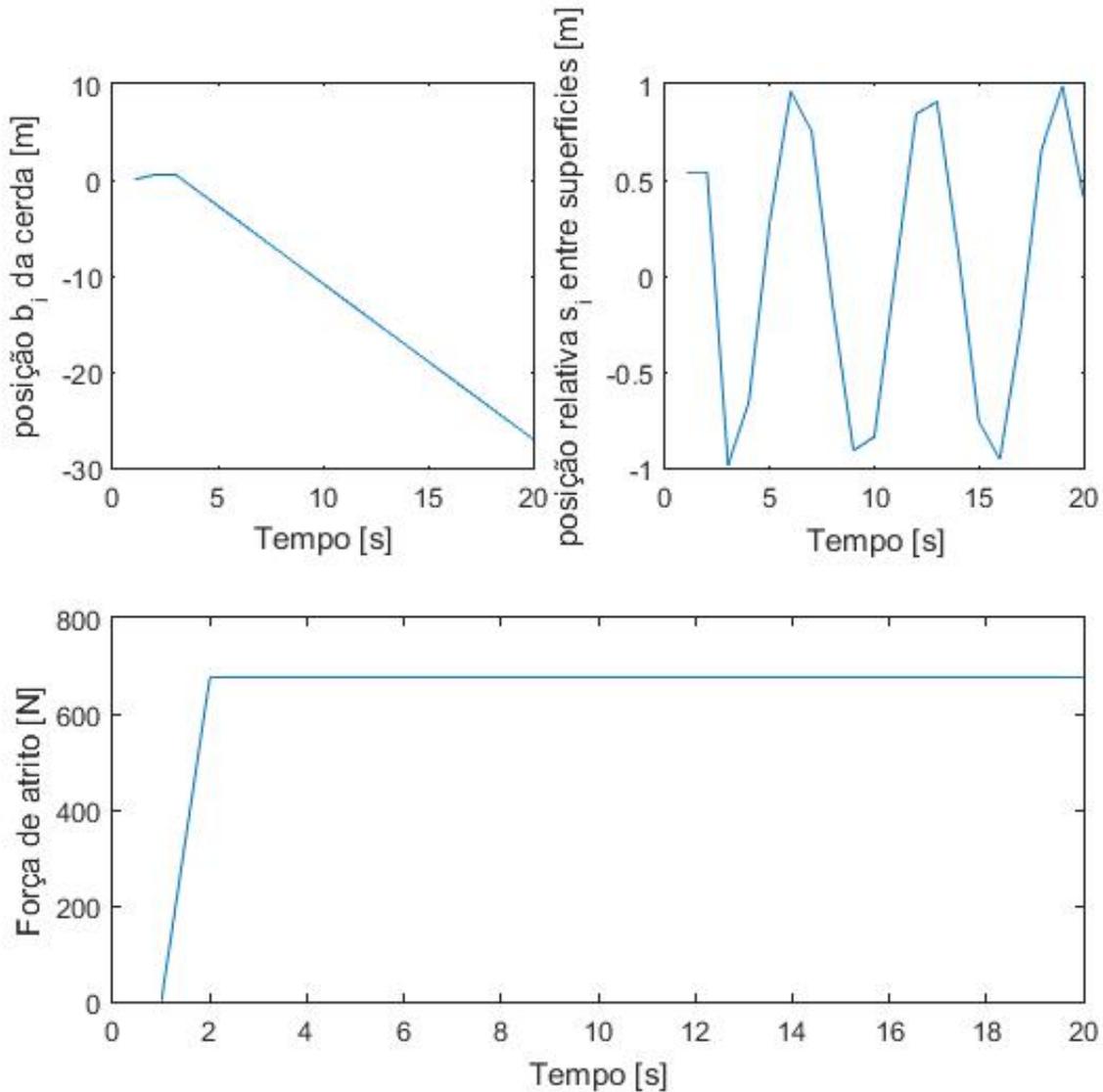


Figura 22: Exemplo numérico do modelo de Cerdas com correção, usando dados fornecidos em (GARCÍA-BAÑOS; IKHOUANE,). A alteração do deslocamento gerou um pico de atrito 300 vezes maior que o anterior, além de resultar em uma posição de cerdas b_i até 30 vezes maior que o deslocamento, ambos resultados que não fazer sentido com o modelo.

Certamente, esse tipo de exemplo não invalida um modelo de atrito. Em verdade, ao se alterar o deslocamento de Dahl para um não-periódico, saindo assim das especificações base do problema, este também passa a fornecer resultados não compatíveis com

os esperados, como pode ser visto na Figura 23. De fato, o comportamento apresentado difere em muito do apresentado na Seção 5.1, o que indica antes um mau uso do modelo do que uma inadequação do mesmo. Esse tipo de análise serve aqui não para invalidar um modelo mas sim para analisar sua adequação ao caso de estudo desejado.

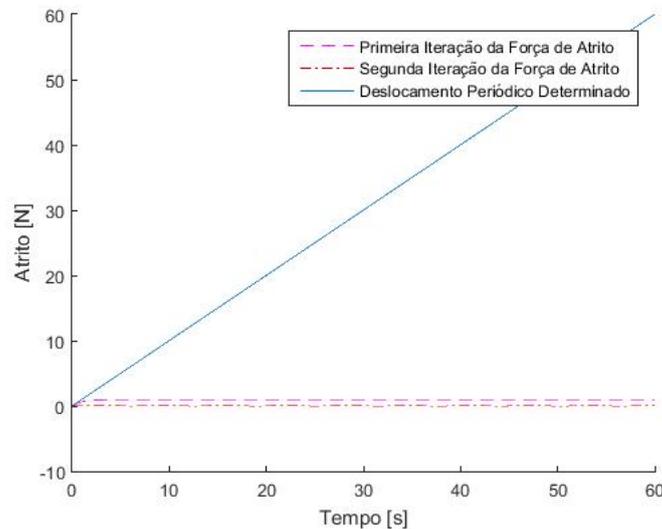


Figura 23: Exemplo numérico do modelo de Dahl usando movimentação não-periódica

Como visto, o modelo de Cerdas possui parâmetros $(K_b, \delta_r, e\sigma_e)$ que dependem de uma previsão inicial de um atrito nominal qualquer condizente com a situação. No artigo original de (HAESSIG; FRIEDLAND, 1990), este atrito nominal é estimado com base no peso do modelo e da força externa aplicada sobre ele. Para fins de comparação entre os modelos, este será aqui entendido como o atrito seco de Coulomb. Apesar de ser o modelo de maior inspiração física, a forma como seus parâmetros são obtidos dependem de uma observação mais cuidadosa e controlada de forma que, para se aplicar este modelo, seria necessária toda uma análise prévia ao invés de apenas um ciclo de movimentação, fato que o torna menos atraente no contexto deste trabalho.

5.2.2 Modelo de Resetamento de Integrador

No mesmo artigo onde se dá a apresentação do modelo de cerdas, (HAESSIG; FRIEDLAND, 1990), é dito que este foi feito pensando-se antes em acuidade do que eficiência computacional. Assim, outro modelo é apresentado no mesmo trabalho, um que separa o atrito naquele apresentado durante escorregamento e adesão e insere um efeito de amortecimento, de forma a diminuir a carga computacional necessária ao eliminar a "existência" das cerdas e considerando apenas seu comportamento geral.

Denominado "Resetamento de Integrador" (*Reset Integrator Model*) ou RIM, ele se baseia em um integrador que depende do comportamento da velocidade e o qual determina a força de atrito. Com isso, ao invés de se ter que refazer toda uma sequência de comandos

à cada instante para recalcular as posições de cerdas e as deflexões das mesmas, pode-se apenas computar o valor das forças em acordo com a velocidade relativa entre as superfícies de interesse.

Primeiro, é necessário definir o integrador \dot{p} dependente da velocidade relativa V_r , o qual define a variação de posição ao invés de b_i . No caso, $\dot{p} = 0$ para $V_r > 0 | p > p_0$ ou $V_r < 0 | p < -p_0$ e $\dot{p} = V_r$ nos demais casos. Quando $|p| < p_0$, tem-se condição de adesão, durante a qual se adiciona uma carga adicional paK a fim de aumentar a sensação de adesão na simulação, além de um fator de amortecimento $\beta\dot{p}$ para "realismo físico", o qual deve ser não nulo para todo o espaço $\dot{p} \neq 0$.

A determinação das variáveis envolvidas depende do contexto inserido, conforme segue, (HAESSIG; FRIEDLAND, 1990):

- A constante p_0 , a qual define o movimento relativo máximo durante o estado de adesão, deve ser menor do que a menor unidade de medida de interesse utilizada no experimento. Então se a distância percorrida for dada em 1 mm, p_0 deve ser da ordem de 0.1 mm;
- No caso de uma situação específica de adesão-escorregamento, p_0 deve ser tal que seja da mesma grandeza da deformação observada no ponto de transição;
- K_r e a são determinados a fim que as forças de atrito durante adesão e escorregamento estejam em acordo com forças pré-determinadas;
- O fator de amortecimento β é arbitrário, dependendo apenas do comportamento do modelo durante a fase de adesão.

Com isso, a força de atrito passa a ser escrita como $F_f = K_r(V_r)p_0 \text{sgn}(p)$, com K_r adicionado a fim se permitir relacionar a força à velocidade através de uma coeficiente da "mola" ou cerda. Deve-se notar que, neste caso, a variável que descreve a posição p é uma constante, o que garante condição de escorregamento ao implicar que a velocidade relativa entre superfícies não é nula.

Ainda que o modelo RIM tenha menor carga computacional devido à sua lógica de funcionamento, a obtenção dos parâmetros de interesse continua sendo mais adequada para uma situação controlada do que para um robô ápole em terreno desconhecido, principalmente tendo em vista a forma arbitrária como os parâmetros de adesão e mola são definidos.

5.3 Aplicação dos Modelos

Tanto Cerdas quanto RIM dependem da determinação das forças de atrito em adesão e escorregamento para a obtenção de seus parâmetros de interesse. A aplicação

de qualquer um dos dois dentro de uma rotina de calibragem tal qual idealizada neste trabalho envolveria:

- Determinação do número de cerdas ou de β ;
- Realização de um ciclo completo de movimentação de forma que $V_r(t)$ e s_i sejam armazenados durante todo o ciclo;
- Determinação da força de atrito aparente durante fase de adesão, a qual pode ser dada pelo peso do modelo;
- Determinação da força de atrito aparente durante fase de escorregamento, a qual pode ser dada por um percentual arbitrário em relação ao atrito de adesão;
- Em posse das forças de atrito aparentes, os demais parâmetros são obtidos em acordo com suas dadas relações;
- Realização de um novo ciclo de movimentação;
- Repetir o processo por quantas iterações quanto se julgar necessário.

Em suma, os dois modelos também precisam de ao menos uma iteração inicial para se obter informações com as quais possa determinar o atrito. Entretanto, se em Dahl tem-se por saída uma nova força de atrito baseada em F_C e a qual pode ser obtida com apenas a determinação de um parâmetro, em Cerdas e RIM tem-se a correção constante de uma força de atrito pré-determinada e a qual deve ser atualizada desde o começo a cada rotina de calibragem executada. Com isso, a vantagem dos modelos da divisão entre adesão/escorregamento e nas condições de transição entre estes se perde devido ao número de passos necessários.

5.4 Efeito de Stribeck

Seja o atrito de Coulomb F_c entendido como o atrito seco padrão. Para se obter um atrito viscoso padrão, usa-se a curva de Stribeck. De forma simplificada, o modelo de Stribeck adiciona o efeito da viscosidade no modelo clássico de atrito seco, o qual pode aumentar o coeficiente de atrito, de tal forma que a força de atrito passa a ser dada por $F(v) = (F_c + (F_s - F_c) \cdot \exp\frac{v}{v_s}) + F_v \cdot v$, (OLSSON et al., 1998). Nesta equação, v é a velocidade constante relativa entre as superfícies, F_s é o atrito estático, F_v é a força geradora de movimento e v_s , a velocidade de Stribeck. Ao se analisar essa equação, percebe-se a força de atrito passa a ser inversamente relativa à velocidade de atrito relativa e a velocidade de Stribeck.

Ou seja, como dito em (DANIEL, 1992), o efeito de Stribeck descreve a aparente diminuição da força de atrito com o aumento da velocidade entre as superfícies, além de ser capaz de mensurar o efeito de lubrificantes.

Entretanto, para se obter a velocidade de Stribeck, é necessária a determinação de uma curva de Stribeck, a qual é dada por uma relação entre o coeficiente de atrito do sistema e pelo número de Hersey, (DRIN; ENGINEERING, 2012) tal que H seja o resultado do produto da velocidade de escorregamento pela viscosidade do lubrificante por unidade de carregamento. Entretanto, nesse caso, é necessário saber ou ter um método para se estimar a viscosidade do lubrificante e o coeficiente de atrito do terreno a fim de se obter a velocidade v_s relevante, num processo empírico baseado em reciprocidade, (NANO; JUN, 2016). No caso, a velocidade v_s é o ponto nos dados de velocidade relativa no qual se observe uma queda na curva, de forma que a força de atrito estática F_s se aproxima da de Coulomb em escorregamento F_c , (OLSSON, 1996). Esse estudo inverso para obtenção da curva de Stribeck não é incomum na indústria, principalmente no caso de mancais de deslizamento, onde a espessura de filme de fluido lubrificante tem grande importância, (SHINMI; MAXIMIANO, 2015).

Porém, até o momento deste trabalho, não existe nenhum teste padrão normatizado para a obtenção das curvas (NANO; JUN, 2016), nem nenhuma discussão objetiva na literatura sobre a obtenção dos parâmetros destas em casos de corpos se deslocando por terrenos de maneira independente (como um robô cobra modular em terreno desconhecido), sendo a melhor aproximação de tal caso geral os testes e resultados apresentados em (DANIEL, 1992), onde as curvas são uma relação apenas da força de atrito observada e a velocidade de escorregamento.

Assim sendo, antes de se retomar a discussão sobre modelos dinâmicos de atrito, deve-se determinar qual será o procedimento a ser seguido neste trabalho quanto à parâmetros que dependam de Stribeck. Define-se que em modelos nos quais os artigos base para descrição e aplicação do modelo apresente valores constantes para qualquer parâmetros de Stribeck, esses valores serão utilizados. Se não, a velocidade de Stribeck será determinada de forma arbitrária contanto que se mantenha na mesma ordem de magnitude que a força geradora de movimento F_v , conforme (DANIEL, 1992) e que garanta a condição de $F_s < F_C$ para Coulomb em escorregamento.

5.5 Modelo de LuGre

De acordo com o trabalho em que foi descrito, (Canudas de Wit et al., 1995), o modelo conhecido por LuGre inclui o efeito de Stribeck e variação da força de ruptura, e foi pensado em parte para uma melhor modelagem de sistemas de baixa velocidade e com mudança de direção (referido como *crossing zero velocity*). Seu desenvolvimento referencia os trabalhos feitos nos modelos de Dahl e Cerdas. Para tal, o método precisa

dos parâmetros de curva de Stribeck, os quais descrevem o atrito dinâmico com mudança do sentido da velocidade e efeitos viscosos.

5.5.1 Parâmetros do Modelo

Como dito por Canudas *et al.*, as qualidades quantitativas do atrito são bem conhecidas e de fácil análise, e um reflexo disso são os parâmetros utilizados na descrição do modelo de LuGre, de certa forma um grande apanhado dos modelos de Dahl, Cerdas e Stribeck. Primeiro, discute-se sobre a natureza genérica dos elementos relevantes e depois como eles atuam na força de atrito, de modo que tem-se:

- F_f é a força de atrito tangencial aplicada responsável pelo movimento relativo entre os corpos;
- z é a deflexão média das cerdas;
- σ_0 representa a resistência ao deslocamento das cerdas ;
- σ_1 representa o amortecimento das cerdas;
- σ_2 representa o coeficiente de amortecimento viscoso derivado do modelo de Stribeck.

Foram usados dois artigos como base para identificação dos parâmetros: (PIATKOWSKI, 2014), que tem σ_2 como irrelevante para o atrito em fase de escorregamento com base na curva de Stribeck obtida para o exemplo numérico de Canudas, e (LIU; NIE,), o qual entende σ_2 tal que $\sigma_1 + \sigma_2 = 2\xi\sqrt{m\sigma_0}$, onde ξ é o coeficiente de amortecimento relativo. Ambos baseiam-se no exemplo numérico de Canudas para validar seus métodos, entretanto, ao contrário do visto na Seção 5.1, não houve um único artigo com metodologia específica seguido para reprodução e familiarização com o método, sendo os dois apenas guias para a definição dos parâmetros relevantes.

Assim, tem-se duas formas para a força de atrito. No caso de velocidade de escorregamento variável, $F_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + f(v)$. Para velocidade de escorregamento constante tem-se $F_f = g(v).sgn(v) + f(v)$ onde:

- Não há uma definição direta de z em (HAESSIG; FRIEDLAND, 1990), sendo a deflexão da cerdas uma função da posição das mesmas conforme discutido na Seção 5.2. Em (Canudas de Wit et al., 1995) tem-se que $\dot{z} = v - \frac{|v|}{g(v)} \hat{z} - ke$, com ke sendo uma estimativa de erro de posição, relacionada a b_i
- $f(v)$ advém da curva de Stribeck e da consequente consideração de viscosidade, tal que $f(v) = \sigma_2 v$
- $\dot{z} = v - \frac{\sigma_0 \cdot |v|}{g(v)} z$ advém do *atrito interno*, compreensível como consequência da deflexão das cerdas.

- $g(v)$ é uma função que define a curva de Stribeck do caso em função da velocidade de deslizamento, com $g(v) = F_e + (F_a - F_e)\exp(-|\frac{v}{v_s}|)^\alpha$, onde F_a é a força de adesão e F_e , de escorregamento. Aqui será considerado $\alpha = 1$

A obtenção dos parâmetros deve ser feita da forma mais simples possível, com base nos resultados da literatura, para permitir ao robô de os obter sozinho. Com isso, juntando as informações das referências discutidas nessa seção, a obtenção dos parâmetros de interesse se fará na seguinte ordem:

- σ_2 é obtido de forma a aproximar a força de atrito teórica F_L com velocidade constante à força de atrito prático. Deve-se fazer ajuste para obtenção do atrito prático para evitar dados de pré-escorregamento, posto que σ_2 é um elemento de escorregamento bruto.
- σ_0 seja tal que a força de atrito teórica obtida pelo modelo seja igual à força de atrito experimental máxima, a qual será aqui aproximada para F_c . Entretanto, tal aproximação será feita para o período de escorregamento ($F_c = F_e$), de forma que σ_1 seja desprezível, enquanto um parâmetro de pré-escorregamento.
- De posse dos outros dois parâmetros, σ_1 é obtido, considerando $\xi = 0.5$, com base em (PIATKOWSKI, 2014).
- Os elementos dependentes de Stribeck devem ser obtidos conforme descrito na Seção 5.4.

Como a obtenção dos dados de LuGre dependem do atrito experimental observado, para se validar a reprodução do modelo em rotina feita no *software* Matlab, buscou-se na literatura um trabalho que apresentasse dados de entrada e dados de saída de forma que os resultados pudessem ser reproduzidos. O trabalho de (Canudas de Wit et al., 1995) foi descartado, enquanto exigia itens experimentais não explicados no texto que geraram comportamento um tanto particular da curva de atrito no tempo. Assim, foram utilizados os dados apresentados em (LIU et al., 2015), referentes à LuGre, e os resultados são apresentados na Figura 24.

O comportamento da curva está conforme o esperado com base na literatura. Pode-se notar o comportamento da velocidade em acordo com a movimentação periódica, passando por pontos de zero. De fato, esse comportamento, assim como em Dahl, indica uma velocidade não constante durante o ciclo, o que se deve à mudança de direção e consequente aceleração durante este, porém, ao contrário de Dahl, LuGre não exige uma velocidade constante, de forma que os resultados são - por teoria- mais precisos. Além disso, assim como em Cerdas, a deflexão dos pontos de contato entre as superfícies é sempre positivo, porém segue o mesmo padrão de movimento que a velocidade, ainda que em fase com esta. A existência de fase entre os dois parâmetros quando analisados no

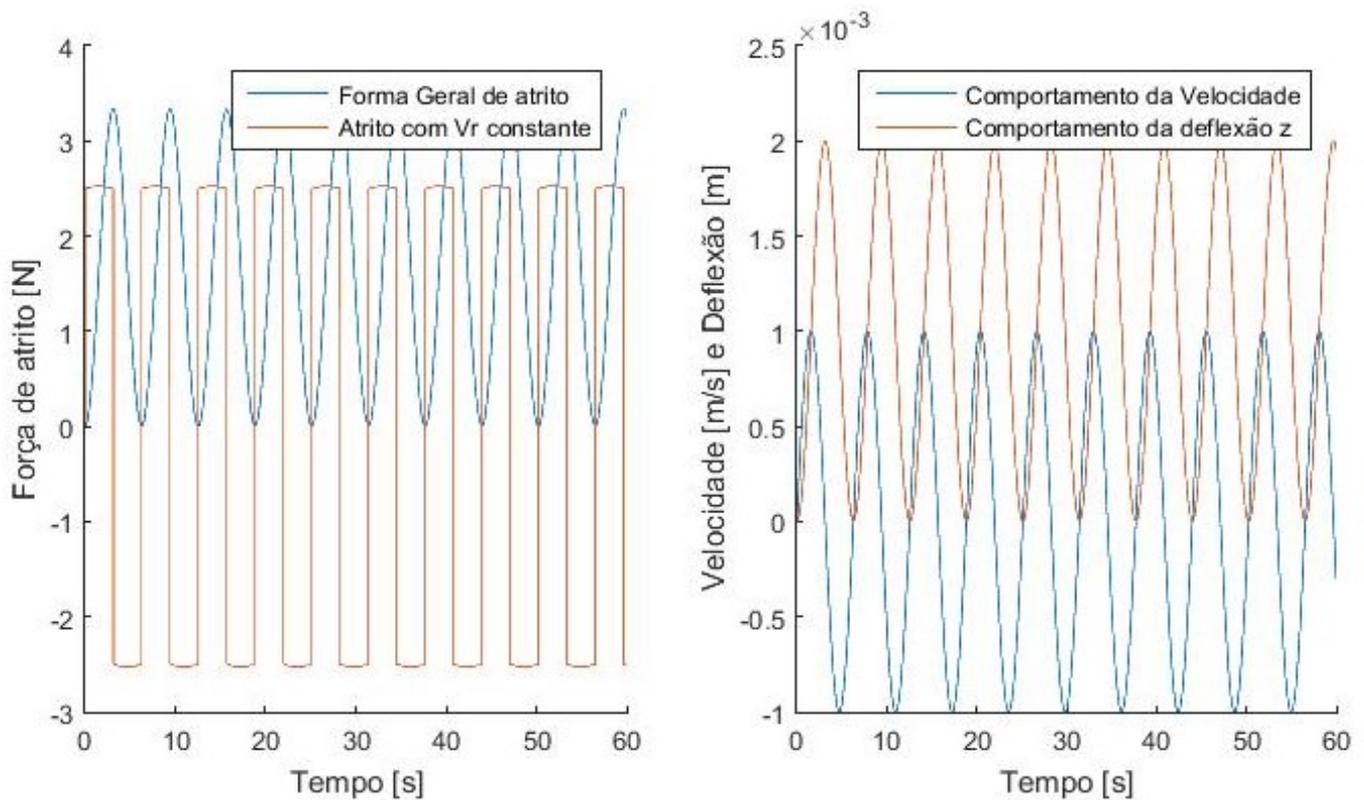


Figura 24: Exemplo numérico do modelo de LuGre usando movimentação periódica, baseado parcialmente em dados de (LIU et al., 2015)

tempo faz sentido do ponto de vista físico, enquanto o pico de deflexão só é alcançado após o pico da velocidade.

Quanto ao atrito, pode-se perceber que a força também se mantém no domínio positivo usando a equação de velocidade variável, mas se comporta fora de forma não condizente com um caso real na equação simplificada de velocidade constante, o que pode ser explicado pelo fato da equação simplificada desconsiderar as características de amortecimento.

Quanto aos valores apresentados nos gráficos, não é possível criar paralelos entre eles e os demais modelos, posto que os casos onde foram implementados são extremamente diferentes, seja em termos de dados de entrada seja em termo de materiais utilizados.

5.5.2 Aplicação do Modelo

Assim, como no modelo de Dahl, LuGre precisa de no mínimo duas iterações: uma para obter os parâmetros de interesse e outra para aplicar os parâmetros obtidos na correção dos demais e assim obter a força de atrito desejada. Entretanto, ao contrário de Cerdas e RIM, LuGre tem uma metodologia clara para a obtenção de tais parâmetros, de forma que os mesmos dependam muito mais dos resultados do ciclo em termos de velocidade observada e distância percorrida do que de qualidades como tipo de terreno específico e características mecânicas da superfície de contato.

- Realização de ciclo inicial de movimentação mantendo velocidade constante;
- Obtenção da Força de Coulomb F_C em estado de adesão;
- Inserção da velocidade de Stribeck v_s ;
- Determinação da Curva de Stribeck
- Determinação de σ_2 , tal que $F_l = F_C = g(v).sgn(v_r) + \sigma_2.v_r$
- Cálculo de F_l de forma $F_l = \sigma_0.z + f_v = F_C$, através do qual se determina σ_0
- Determinação de σ_1 tal que $\sigma_1 = \sqrt{m\sigma_0} - \sigma_2$
- Cálculo da força de atrito completa

Deve notar que há a necessidade de janelamento de dados obtidos em LuGre, enquanto sua análise depende de pontos específicos do movimento. Por exemplo, ao se considerar o coeficiente de amortecimento, deve-se garantir que os dados utilizados em sua obtenção (velocidade no tempo) incluam exclusivamente a fase de escorregamento puro. Além disso, a força de Coulomb considerada assume o papel de maior força de atrito experimental observável, a qual corresponde à situação de adesão e deve portanto ser obtida em acordo.

Esse tipo de seleção de dados não é estranho, tendo em vista que uma das bases do modelo de LuGre é a lógica implementada em Cerdas. Porém, é essa seleção e esse preciosismo em certa medida que o torna um modelo mais amplo que Dahl, ao assumir que existe uma gama de condições de transição durante o movimento de um simples ponto de ruptura. Por fim, esse é o único modelo entre os apresentados neste capítulo que considera a existência de atrito viscoso. Ainda que os dados referentes à Stribeck não sejam obtidos a cada calibragem, a simples adição dos mesmos já muda a resposta do sistema.

5.6 Resumo dos Modelos

Foram aqui apresentados quatro modelos de atrito diferentes, sendo dois deles relacionados e portanto discutidos na mesma seção. Em todos os casos, os parâmetros necessários para aplicação dos modelos podem, em teoria, ser obtidos pelo robô de movimentação cobra através de uma rotina de calibragem na qual se possa obter sua velocidade, deslocamento e comportamento dinâmico em geral, desconsiderando o terreno no qual este se encontra.

Os quatro modelos são de certa forma uma evolução entre si, tendo Dahl por base, e todos eles podem ser considerados casos gerais do atrito clássico seco de Coulomb, sendo reduzidos a este com as devidas considerações. Entretanto, eles diferem tanto em dados de

entrada como na forma como estes são processados, o que inevitavelmente gera resultados diversos.

Na Tabela 3, é apresentado um resumo dos modelos apresentados neste capítulo, a fim de condensar as informações e facilitar sua análise.

Como pode ser visto, todos os modelos pedem pelo deslocamento em função do tempo, da velocidade relativa - contante ou não - entre as superfícies de contato, as quais podem ser obtidas pelo uso de sensores, conforme será discutido no Capítulo 6 ou com base nas curvas de movimentação. Dahl e LuGre dependem da determinação de uma força de atrito a qual possa ser equivalente ao modelo seco clássico ou de Coulomb, o qual deve poder ser obtido através de uma primeira iteração, onde seja realizado um ciclo de movimentação no local de interesse de forma que se observe diferenças entre condições teóricas e práticas, conforme discutido na Seção 4.4. Essa mesma força experimental pode ser aplicada em Cerdas e RIM, de forma que todos os quatro modelos podem ser iniciados com as mesmas informações derivadas do sistema.

Quanto às entradas de modelo, Dahl é o único que corrige automaticamente sua entrada sozinho. Os demais pedem por um valor inicial qualquer arbitrado com base na situação onde o robô se encontre. No caso de Cerdas e RIM, esses parâmetros podem ser corrigidos dentro do próprio modelo, porém como eles determinam a primeira força de atrito a ser analisada ao mesmo tempo em que dependem diretamente da primeira força teórica, a convergência da informação pode ser demorada. Quanto à LuGre, o parâmetro arbitrado diz respeito à Stribeck e, tendo em vista a literatura, a obtenção deles não costuma ser muito precisa em casos gerais, com exceção de mancais de deslizamento, nos quais atrito viscoso é um fator de importância. Além disso, o mesmo pode ser alterado com razoável facilidade durante as iterações.

O modelo de Cerdas é o único que não pede solução de EDO durante sua execução, porém ele depende de uma série de condições *if else* as quais devem ser planejadas a fim de simular adesão e escorregamento, através das quais a força de atrito é determinada com base no número de iterações, o que o torna, como admitido, um modelo pesado do ponto de vista computacional. Em RIM, a solução de EDO depende diretamente da velocidade considerada, sendo uma mescla de condição *if else* e integração.

Independente do modelo utilizado, sua eficácia dentro do escopo deste trabalho depende das informações que o robô pode, teoricamente, fornecer durante a execução de sua rotina, o que serve como guia tanto para a geometria deste quanto para a escolha de sensores que lhe sejam necessários.

	Dahl	Cerdas	RIM	LuGre
Entrada Sensores/ Curva	Velocidade Relativa; Deslocamento $x(t) = x(t+T)$; Tempo de ciclo	Velocidade Relativa V_r ; Deslocamento $x(t)$	Velocidade Relativa no tempo;	Velocidade relativa; Deslocamento no tempo
Entrada Sistema	Força de atrito de Coulomb F_C	Raio de aparecimento de cerdas δ_b	Força de atrito $F(V_r)$	Força de atrito de Coulomb; Tempo total de ciclo
Entrada Modelo	Fator de histerese inicial ρ_1	Deflexão de ruptura das cerdas σ_b ; Resistência K_b das cerdas; Número de cerdas, pode ser dependente da velocidade	Movimento relativo máximo p_0 ; Fator de amortecimento β	Força de atrito de Stribeck;
Saída Primeira Iteração	Primeiro Atrito, supondo velocidade constante	Posição das cerdas b_i ; Deflexão das cerdas σ_b ; Forças de atrito de escorregamento e de adesão	Característica de cerda K_r ; Fator de adesão α	Resistência ao deslocamento das cerdas σ_1 ; Amortecimento das cerdas σ_1 ; Amortecimento viscoso σ_2
Parâmetros Dentro do Modelo	$w(t)$, relacionando atrito de Dahl e de Coulomb; σ_a , dado pelos pontos inicial e final	Deflexão de cerda no tempo δ_i , dependente da força de atrito obtida a cada iteração	Integrador \dot{p}	Deflexão de cerdas
Saída Final	Força de atrito de Dahl, dependente do tempo	Força de atrito das cerdas, para estado de adesão e de escorregamento	Força de atrito ao longo do tempo, dependente da velocidade relativa e do movimento relativo máximo	Força de atrito em função do tempo para velocidades constante e variável; Atrito com base em Stribeck

Tabela 3: Descrição das entradas, saídas e parâmetros de quatro modelos de atrito

6 Medição e Controle

6.1 Sensores Biológicos

Seres vivos possuem uma série de sensores periféricos através dos quais são capazes de detectar estímulos sensoriais presentes no ambiente no qual se encontrem, (DERBY; STEULLET, 2001). É através das informações obtidas por estes sensores (como nível de luminosidade, presença de odores, padrão de vibrações) que os animais obtêm um senso qualitativo e quantitativo do ambiente, o que influencia seus comportamentos, sendo os comportamentos determinados relacionados a forma do animal de buscar alimento, acasalar e sobreviver. Pensando no caso de um cachorro, ele não sabe quantitativamente a temperatura do ambiente, mas seu corpo é capaz de mensurar tal informação e ajustar seu funcionamento, por exemplo ao alterar exposição de pontos principais de trocas de calor ou regular o ritmo cardíaco.

Ainda conforme (DERBY; STEULLET, 2001), mais do que fornecer informações, os próprios sensores auxiliam a formar uma resposta já no ato da coleta, onde uma variedade de elementos sensoriais distribuídos em alto número ao longo de um corpo ajudam a discriminar uma informação ou a corrigi-la, como no caso de insetos, com sensores olfativos e gustativos funcionando em conjunto para uma mesma análise, porém com estilos de obtenção e identificação diferentes. Ou seja, uma mesma fonte pode dar duas respostas diferentes (edível e inedível) ao passar por dois pontos de sensoriamento.

Assim, em um projeto que envolva o uso de sensores para obtenção de informações relativas ao ambiente percebe-se que existem quatro pontos principais a serem considerados: qual o objetivo da informação, como ela será obtida, como será processada e como se dá a resposta à mesma. Pensando sobre biomimética, um ponto de análise enriquecedor é a movimentação de robôs baseados em animais quadrúpedes. Para que o robô se mova, ele precisa manter equilíbrio, o que é feito ao se controlar a angulação entre as patas e o solo e a distribuição de posição destas, através de sensores de pressão além de medidores de velocidade e aceleração. Com isso, o robô é capaz de corrigir sua posição e a posição relativa à seu centro de seus membros para não tombar, como visto em (LEE; BIEWENER, 2011).

Tendo em vista que o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma rotina

de calibragem que um robô de movimentação cobra possa executar de forma independente para reconhecer o atrito de seu terreno, os sensores devem ser capazes de obter informações de acordo com o local onde se encontra com base em parâmetros que envolvam seu deslocamento, como distância percorrida em um ciclo determinado ou torque aplicado durante o movimento. Entretanto, tais coletas de dados devem ser feitas de maneira condizente com os requisitos de movimentação discutidos no capítulo 3, a fim de simplificar o processo e o tornar mais plausível. Por fim, as informações obtidas devem ser passíveis de inserção em um modelo de atrito pré-determinado, tendo por base as discussões de parâmetros apresentadas no Capítulo 5, a partir do quais o robô possa desenvolver uma resposta, seja essa corrigindo seus dados de entrada para movimento (velocidade, ângulo de junta), seja corrigindo seu número de ciclos estimados para percorrer uma distância determinada.

6.2 Requisitos dos sistemas de medição

De acordo com a teoria de atrito discutida na Seção 4, existem parâmetros que podem ser medidos para verificar os efeitos da força de atrito durante o movimento, como deslocamento real e torque em velocidade constante.

Um fator de início a ser considerado é que os sensores disponíveis tenham peso e tamanho condizente com as dimensões dos módulos de teste. Ainda que neste trabalho seja discutido apenas o desenvolvimento de uma rotina de calibragem, a utilidade dela depende do quão realista esta seja. Por isso, sensores com maior precisão mas que não possam ser embarcados não serão considerados.

Além da possibilidade do sistema ser embarcado, outra característica de interesse é a precisão dos sensores. Ao pensar nos modelos de atrito discutidos em 5, por exemplo, qual seria a precisão necessária para se identificar com segurança todos os parâmetros de interesse? Essa noção depende do modelo mas, para o caso de LuGre, há uma estimativa feita em (OLSSON, 1996) de seria necessário uma resolução de 10^{-4} para posição, em milímetros, o que já é mais do que o erro de alguns sensores aqui apresentados. Um sensor com tal precisão provavelmente não poderia ser embarcado nos protótipos VDM por questões ou dimensionais ou financeiras. Assim, sendo o objetivo deste trabalho um processo de calibragem que o robô seja capaz de realizar sozinho, em ambiente desconhecido, seguindo uma rotina realizável apenas com sua estrutura e o terreno de contato, definir a precisão via modelos não é a melhor estratégia. Esse problema voltará a ser discutido no capítulo 7.

Contudo, a simples obtenção de informações não é suficiente. Elas precisam ser processadas e analisadas a fim de se tornarem úteis e o estudo de literatura em controle dinâmico é uma boa base tal. Tendo-se em vista que "*o controle de força em robôs é o controle das forças de contato entre a máquina e o ambiente*", (DANIEL, 1992), a questão

da força de atrito surge naturalmente em trabalhos deste cunho, muitas vezes como um fator limitante devido às suas características dissipativas e não-lineares: o controle de um sistema perde informação e precisão devido ao atrito inerente em suas juntas e pontos de contato.

Esse fato se torna mais real quanto maiores forem os níveis de deformação entre as superfícies de contato, o que traz também a questão de ciclos limites, ou o número máximo de ciclos de dois pontos de contato rígidos podem executar antes de começarem a perder eficiência devido à deformação e eventual atrito entre si. E o problema se agrava conforme diminuem as ordens de grandeza da velocidade e do deslocamento do sistema em questão, (DANIEL, 1992).

Com isso, ao se pensar no interesse deste trabalho, tendo em vista que robôs modulares e cobra não costumam ter módulos de dimensões superiores à 30 cm e que seu deslocamento é diretamente proporcional à estas, e que a rotina aqui discutida visa ser implementada em quaisquer ambientes - com quaisquer níveis de deformação - um estudo de controle dentro da discussão de sensores a serem utilizados na rotina de calibragem é necessário.

6.3 Controle de Movimento e Torque

Um controle adequado do deslocamento de robôs e seus elementos durante a execução de suas tarefas é uma questão de segurança tanto para seus operadores quanto para sua estrutura, buscando evitar movimentos bruscos fora de contexto e aplicação de forças desnecessárias sobre seus mecanismos. Existem dois grandes grupos de controle aplicados à essa vertente, dentro dos quais podem ser encontradas ramificações e especificações, sendo estes, (KHAN et al., 2014):

- Controle de Força Direto: uma força é mantida no sistema através do fechamento de um loop qualquer relativo ao maquinário;
- Controle de Força Indireto: uma força é mantida em um sistema através da variação de posição e movimento.

O que diferencia os tipos de controle são antes a relação entre sua entrada e resposta do que a definição das mesmas. Um bom exemplo é o controle de tendência (*compliance control*) o qual, ainda que considerado uma ramificação de controle de forças indireto, tem suas subcategorias.

Tendência Passiva (*passive compliance*) é baseada nas características inerentes de uma máquina, como a rigidez de suas juntas ou presença de sistemas de amortecimento. Nesse caso, o loop está fechado, delimitado pelo próprio robô e todas as reações observáveis a partir dele já estão mapeadas. Tendência Ativa (*active compliance*) resulta do controle de

juntas de atuação diretamente, através de análise de torque executado ou força percebida, as quais podem ser alteradas em acordo com mudanças de velocidade de atuação ou deslocamentos máximos e mínimos.

Deve-se notar também que um mesmo tipo de controle pode ser usado para mais de um aspecto dentro do mesmo robô, como controle de tendência de posição no tempo e curvatura no espaço, (ROLLINSON; CHOSET, 2013). O que também significa rodar uma rotina de controle em diferentes elementos do modelo, como velocidade e ângulo de atuação.

Independente do tipo de controle, um elemento constante em robótica é o torque. No caso do controle por tendência, essa grandeza pode ser usada tanto de forma passiva quanto ativa, podendo ser medida como entrada ou como saída enquanto sendo, por definição, uma relação direta entre comando e execução. O torque executado por uma junta tem capacidade para realizar um deslocamento específico, o qual pode ser determinado usando apenas características mecânicas do robô (braço de atuação).

Com isso, o torque pode ser uma medida de desempenho: o torque necessário pode ser traduzido em velocidade ou aceleração executadas e em potência requisitada, ambas grandezas passíveis de determinação, por giroscópios, acelerômetros, sensores, potenciômetros e uma seleção de equipamentos compatíveis com um robô modular ápole. Em resumo, trata-se de uma grandeza adaptável à teoria de controle, podendo ser constante ou variável e sendo seus valores alteráveis e observáveis.

Considerando as equações de movimentação cobra discutidas no Capítulo 3, pode-se notar que a posição do robô no tempo sempre depende dos ângulos de bloco e junta realizados por seu atuador com um dado torque, existem duas questões quanto ao controle do robô em geral: como medir os torque de entrada teórico e o efeito real deste.

6.3.1 Series Elastic Actuator: SEA

Seja impedância dada em Newtons por metro e seja seu inverso a admitância. Essa característica em um sistema permite relacionar de forma direta uma força qualquer com um resultado dinâmico (velocidade/deslocamento) observável, de forma que uma alta admitância resultaria em movimentações a maior velocidade para uma dada força do que um caso de alta impedância. Essa definição permite o uso de técnicas de controle mistas (*hybrid position/force control*), (KHAN et al., 2014), onde pode-se alternar entre força e deslocamento constantes de acordo com tempo ou posição. Ao se relacionar os dois, seria possível alterar entre os modos usando um mesmo comando.

Essa lógica da impedância é particularmente útil dentro da questão de movimentação ápole, onde o torque real de atuação de um módulo qualquer poderia ser medido com base na potência requerida pelo atuador durante sua execução, de forma a relacionar não só a diferença entre o torque teórico de comando e o real executado mantendo ou-

tros parâmetros (como deslocamento dentro da curva e velocidade tangencial) contantes. Entretanto, devido a elementos não-lineares de terreno, como atrito, esse resultado pode não ser condizente com a realidade. Uma solução que tem ganhado espaço na literatura é a implementação de SEAs, como pode ser visto nos trabalhos da *Carnegie Mellon University*, (ROLLINSON et al.,) e cujas aplicações a outros ramos além da robótica com movimentação ápole, como desenvolvimento de órteses, (JARDIM; SIQUEIRA, 2014).

O SEA se trata de um atuador com controle ativo de força, a qual é medida pela deflexão de uma mola através de um potenciômetro dentro de um loop fechado. Dessa forma, o robô é capaz de corrigir seus elementos de movimentação sem ter a necessidade de perceber o ambiente ao seu redor ou de fazer alguma análise completa quanto ao atrito local, (ROLLINSON et al., 2014).

Em (MARTINS et al.,) é apresentada uma proposta para transformar um servo comum em um SEA. O objetivo do trabalho é aplicar os servos alterados em sistemas de juntas para próteses humanas, posto que estes permitiriam uma compensação de forças mais dinâmica e movimentação mais suave. No trabalho é disponibilizada toda a logística por trás da manufatura, com parte mostrada na Figura 25.

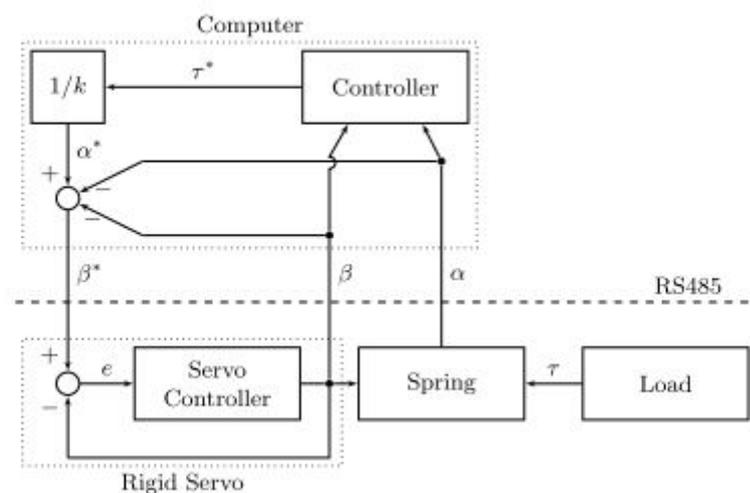


Figura 25: Diagrama de um sistema SEA, FONTE: (MARTINS et al.,)

De certa forma, o uso de servos modelo SEA são uma das melhores opções em termos de controle de junta - e deslocamento - de robôs com movimentação cobra atualmente, principalmente quando se leva em consideração de que ele faz uso de um sistema já essencial ao funcionamento do robô -servo motor- e apenas adiciona uma função extra a este. Além disso, por se tratar de um controle de tendência com base na deformação da mola acoplada, se torna mais fácil determinar pontos de mínima e máxima, ajudando a preservar o robô como um todo ao evitar cargas excessivas.

Contudo, ao se eliminar a necessidade de observar o comportamento do robô ao interagir com o ambiente, acaba-se por perder informações sobre terreno. Isso não é um problema no caso dos robôs desenvolvidos pela *Carnegie Mellon University*, cujo foco é

a movimentação por canos, assim como não o é para atuadores aplicados em tecnologias assistivas como órteses e próteses, (JARDIM; SIQUEIRA, 2014). Em ambos os casos, principal é o controle de movimentação e a segurança de seus usuários, trata-se de um problema antes de precisão do que de adaptabilidade. Entretanto, ao se pensar em situações de busca e salvamento com condições desconhecidas e imprevisíveis, a obtenção de informações em tempo real sobre o terreno são extremamente úteis, não só para o robô, (GONZALEZ-GOMEZ et al.,), o qual deve ser capaz de adaptar-se constantemente à situação, mas para seus operadores, que podem obter atualizações sobre estabilidade, vazamento e acúmulo de detritos.

6.4 Compensação de Atrito

Não faz sentido pensar em como se "eliminar" o atrito, este pode apenas ser compensado, um dos grandes desafios da indústria, principalmente no que diz respeito à precisão. Compensações em baixo ou em alto nível reduzem ciclo de vida e eficiência de diversos tipos de máquinas, (DANIEL, 1992). E mesmo pensando em uma compensação adequada, deve-se considerar como ela seria feita: A cada ponto de contato seguindo lógica de controle de tendência ativa ou considerando uma resultante de maneira passiva. Afinal, ao se pensar em um terreno qualquer, a presença de detritos pode afetar o atrito devido ao contato do maquinário com o solo, porém mantendo os atritos intrínsecos inalterados.

Em (ZHU; LYU; OLOFSSON, 2015), é demonstrado como as condições ambientais influenciam o desempenho de trens devido as mudanças na superfície dos trilhos que eles percorrem. É um exemplo claro sobre a importância que as mudanças na composição da superfície de contato tem sobre um elemento em movimento. Os efeitos considerados incluíram pressão, temperatura, umidade e simulação de depósito de matéria orgânica sob os trilhos e os resultados mostraram desvios de média em relação a trilhos considerados limpos e não afetados, ou ideais.

De fato, enquanto um corpo se move de maneira teoricamente controlada em um terreno desconhecido ativamente buscando informações sobre sua interação dinâmica com o mesmo, torna-se possível criar hipóteses quanto às condições da superfície e do ambiente em geral mesmo sem dados visuais ou sonoros usando, por exemplo, a questão do atrito, como exemplificado a seguir.

- Atrito seco é diferente de viscoso, não apenas em termos de modelo e coeficiente mas também no que diz respeito ao comportamento esperado das superfícies, sobretudo quanto à velocidade. Portanto, uma diminuição inesperada de atrito em algum ponto do caminho do robô pode indicar existência de um filme de fluido;
- As ordens de grandeza de deslocamento e velocidade relativa entre superfícies influenciam na precisão dos modelos utilizados e nos comportamentos esperados durante

um ciclo de movimento qualquer. Porém, se o robô se vir incapaz de realizar a rotina por falta de espaço sem obstáculos ou se apresentar uma velocidade com comportamento mais irregular, isso é uma informação sobre as condições do terreno em si;

- O movimento não é caracterizado apenas pela mudança de estático para dinâmico, existindo uma gama de fenômenos intermediários. Portanto, a mesma rotina com mesmos parâmetros pode dar resultados diferentes devido à existência de detritos ou devido à inclinações de terreno que favoreçam, por exemplo, pontos de adesão-escorregamento;
- A área de contato aparente não é necessariamente a área real considerada, faz mais sentido considerar pontos de contato e distribuição de massa. Porém, como esses elementos são previsíveis através de teoria, resultados práticos que desviem acima de um nível pré-determinado poder também indicar que existe alguma condição na superfície de contato que esteja influenciando a comparação.

Além disso, a consideração de um único parâmetro de controle pode se mostrar ineficaz em dadas condições, tais quais onde o atrito se mostre com baixa dependência de torque ou velocidade observados no robô, (DANIEL, 1992). Isso se torna mais real quando se faz necessário o uso de filtros na obtenção de dados e janelamentos dos resultados, necessário por exemplo ao se considerar o uso do modelo de atrito de LuGre, conforme discutido no Capítulo 4. Nesses casos, a própria teoria de controle já traz uma solução em sua definição de modelos híbridos.

6.5 Medição de Distância Entre Dois Pontos

Não é de todo verdade dizer que o uso do SEA elimina toda a informação do ambiente que o robô poderia receber, a questão principal, assim como em qualquer caso de controle, é sobre como estes são utilizados. No caso de um robô subindo verticalmente em espiral por um cano com diâmetro não constante, por exemplo. É necessário que sua morfologia seja suficiente para que ele não escorregue porém com folga tal que os mecanismos não sejam danificados por esforço demasiado, (ROLLINSON; CHOSSET, 2013). O uso de SEAs no robô, permitiram que esse percebesse melhor as mudanças no diâmetro durante seu avanço ao corrigir o torque de atuação de cada módulo com base na força utilizada pelo robô e ainda que essa informação não seja suficiente, ela ajuda a determinar a amplitude de cada ponto ao permitir uma correção dos ângulos reais realizados. Em suma, não é absurdo o uso de duas informações conjuntas no controle de um mecanismo, a fim de se obter tanto uma maior precisão da movimentação quanto ser capaz de observar possíveis motivos responsáveis pela diferença entre os casos teórico e real.

Nesse caso, um ponto de interesse seria distância entre dois pontos quaisquer do robô. Pela teoria da movimentação cobra apresentada no capítulo 3, é possível determinar a posição de um dado ponto (como centro geométrico) em qualquer módulo que componha a curva de interesse no tempo tendo por informação os ângulos executados durante um ciclo qualquer de deslocamento. Com isso, apresentam-se as seguintes possibilidades:

- Determinar os ângulos reais realizados durante o ciclo de interesse através do controle de torque nas juntas e, com isso, saber as posições relativas reais entre os módulos, as quais podem ser comparadas com as posições teóricas no caso de um sistema linear;
- Realizar controle indireto do torque mantendo-o constante a todo instante durante o ciclo e determinar a diferença entre dois pontos dentro da curva de movimentação, resultante da realização de ângulos de atuação não necessariamente ideais;
- Manter-se velocidade ou deslocamento constantes durante um período de tempo controlado e observar qual foi o torque necessário para tal, fazendo controle direto das forças executadas sobre o robô.

Com isso, ao se considerar tanto o torque (controle de junta) quanto as coordenadas do robô no espaço (controle de posição), realiza-se um controle de tendência híbrido, onde estão inclusos tanto os pontos de contato intrínsecos ao sistema, quanto as forças externas consequentes do terreno.

A união desses dois elementos permite tanto obter uma estimativa do atrito e das condições do local quanto a compensação de atuação do robô de forma dinâmica de acordo com seu avanço, sendo assim a base para o desenvolvimento da rotina de calibragem de interesse neste trabalho.

7 Sobre a Rotina de Calibragem

Até este ponto do trabalho foi apresentada uma revisão bibliográfica sobre robôs modulares, movimentação cobra, atrito e sensores de medição. Com base nas informações obtidas durante o processo, é aqui proposta uma rotina de calibragem, a qual depende de três hipóteses:

- O robô sabe as posições ideais de todos os seus módulos pelos métodos descritos nas curvas de locomoção discutidas no Capítulo 3
- Cauda e Cabeça são capazes de identificar suas posições relativas, usando ou a geometria de sua própria estrutura, conforme discutido no Capítulo 3, ou usando dados de sensores embarcados, conforme discutido no Capítulo 6
- O robô sempre possuirá o número mínimo de módulos para realizar as rotinas propostas.

Além das hipóteses, todo o desenvolvimento da rotina aqui apresentada será feita de forma generalizada, porém utilizando os protótipos da série VDM como referência em caso de aplicação das teorias apresentadas.

7.1 Lógica do Processo

Como visto nos exemplos desenvolvidos em (MARCO; TRINDADE, 2011), a determinação da força de atrito e seus coeficientes é feita por análise reversa. Ou seja, cria-se uma modelagem e uma situação em que se possa observar algum nível de deformação, dissipação ou impedimento ao movimento para então tentar conectar esse efeito a uma causa. Com isso, a observação do atrito passa a ser dependente de um "coeficiente" e passa a ser deduzível por um "resultado", o qual pode ser analisado de forma reversa a fim de obter parâmetros que permitam estimar o atrito em pontos futuros do caminho a ser percorrido.

Essa "situação" pode ser um ciclo de movimentação completo, através do qual seja possível observar a influência da força de atrito sobre os corpos analisados. Seria o equivalente à uma iteração-0 antes de se iniciar a análise, conceito semelhante aos processos

dos modelos de Dahl e LuGre, conforme visto no Capítulo 5. Entretanto, estas mesmas condições teóricas devem ser aqui adaptadas para que possam se aplicar em contexto prático. Ou seja, deve-se planejar uma rotina tal que, ao se realizar a iteração-0, esta tenha mínima influência de ruídos porém ainda seja capaz de obter os parâmetros desejados, principalmente ao se considerar que a mesma é aqui pensada para ser realizada em terreno desconhecido.

o primeiro ponto da modelagem é definir **como o robô será afetado pelo atrito**. Ainda que possa soar trivial, esse é o primeiro passo da modelagem, enquanto consiste na definição dos parâmetros que serão efetivamente considerados - o que também definirá parte do trabalho e peso computacional tanto quanto aos dados que o robô deve coletar quanto de até que ponto a análise deve ser feita.

Primeiro, assume-se que o robô é passível de sofrer **efeitos de atrito seco** - dependente da massa da estrutura - e **viscoso** - dependente da velocidade do movimento - igualmente. Ao se considerar suas situações diferentes, é mais simples considerar o atrito como uma força dissipativa - não fazendo distinção entre seco e viscoso durante a coleta.

Em seguida, ainda que nem todos os modelos sejam capazes de computar a mudança de direção com precisão, esse é um fator que deve ser observado durante a movimentação, ainda mais se considerado que ambas as curvas - Serpenteóide e Serpentina - definem movimentação contínua e com mudança de orientação de atuadores para gerar o movimento, como discutido na Seção 3.1.1. Assim, **a calibragem deve considerar ao menos uma situação de mudança direcional ao longo de seu processo** - mesmo que a coleta não seja feita *durante* a dita mudança. Essa condição também servirá para uma análise completa envolvendo toda a transição entre estático para em movimento para estático novamente: um ciclo de locomoção.

Por fim, como se sabe que a área superficial não é necessariamente a área de contato real, ainda mais considerando o uso de superfície texturizada para reprodução de anisotropia, não vale a pena limitar a calibragem por superfície. O que deve ser considerado são a massa e a velocidade dos módulos e o comportamento destes como conjunto - com testes preliminares para análise de adequação de modelagem estática se necessário.

Assim, o processo será dividido em quatro etapas: Posicionamento, Movimentação, Coleta de Dados e Análise, como elaborados na Tabela 4. Cada etapa envolve uma série de considerações envolvendo os conceitos previamente elaborados, com suas principais características sendo discutidos no restante da seção.

A ideia principal deste trabalho é a análise de atrito na movimentação macro do robô, mas também será considerado se a calibragem é capaz de detectar mudanças no desempenho dos atuadores - ou seja, se os ângulos desenvolvidos correspondem as expectativas. O desempenho destes pode ser alterado por conta do acúmulo de detritos. Como a abordagem visa o robô *tão genérico* quanto possível está consideração pode ser observada sem fuga de escopo do trabalho.

Etapa	Justificativa	Interação com Robô
Posicionamento	Partindo do pressuposto que as condições de terreno sejam desconhecidas, e sabendo que o robô pode precisar de um raio mínimo para realização da calibragem, o ideal é que este assuma uma posição que lhe seja segura e eficiente	O robô deve possuir algum comando de pré-calibragem e uma noção de posicionamento relativo entre seus módulos para assumir uma posição de <i>stand by</i> ideal
Movimentação	Como dito, o atrito é observado durante a interação entre duas superfícies - e o meio mais simples de garantir é por meio do deslocamento relativo	Neste caso, ao invés de uma máquina ou de um sistema de atuação que mova o corpo, o próprio robô seria o responsável pela execução do deslocamento de sua própria superfície contra a do terreno em que se encontra
Coleta de Dados	Idealmente, um robô só deve executar uma tarefa se esta fizer parte de uma missão. Neste caso, a coleta de informações que lhe permitam ter uma noção de atrito do terreno em que encontra	O robô deverá possuir componentes necessários e suficientes para coleta de dados, sejam estes posição, gasto energético ou velocidade. Qualquer dado que permita uma comparação entre o movimento teórico e o real
Análise	A coleta de dados só faz sentido se estes puderem ser úteis, particularmente em tempo real ou sem necessidade de análise por equipamentos - e pessoas- externas ao local do robô	O sistema de análise deve ser, idealmente, interno ao robô, de modo que ele possa computar os dados obtidos e implementá-los em uma rotina pré-estabelecida que lhe permita alguma conclusão de valor qualitativo e quantitativo

Tabela 4: Etapas envolvidas no processo de calibragem

7.2 Teoria Sugerida

O modelo mais simples e útil para definição dos efeitos da força de atrito é o de dissipação, enquanto passível de modelagem por equilíbrio de energia e por não requerer uso de maquinário externo, apenas uma forma de medir os parâmetros necessários ao balanço. Com isso, o primeiro passo do sistema de calibragem é definir os ditos parâmetros. Pelas diretrizes aqui propostas, eles devem ser observáveis no robô, devem poder ser medidos com equipamentos do próprio robô e preferencialmente devem trazer mais informações do que apenas o atrito, a fim de maximizar o aproveitamento de recursos.

Como demonstrado no Capítulo 3, é possível determinar a forma do robô no espaço usando elementos das curvas de movimentação cobra, e o inverso também é válido: com base na forma do robô no espaço, determinar as variáveis de seu deslocamento. Neste caso, supondo uma condição pré-determinada (velocidade, formato, limitações geométricas) ângulos alvo são definidos para cada atuador. Logo, tendo conhecimento das medidas dimensionais de todos os módulos - uma premissa da própria lógica de atuação - seria possível calcular a posição ideal de alguns módulos e checar a diferença entre o cálculo ideal e a realidade, como indicado na Figura 26.

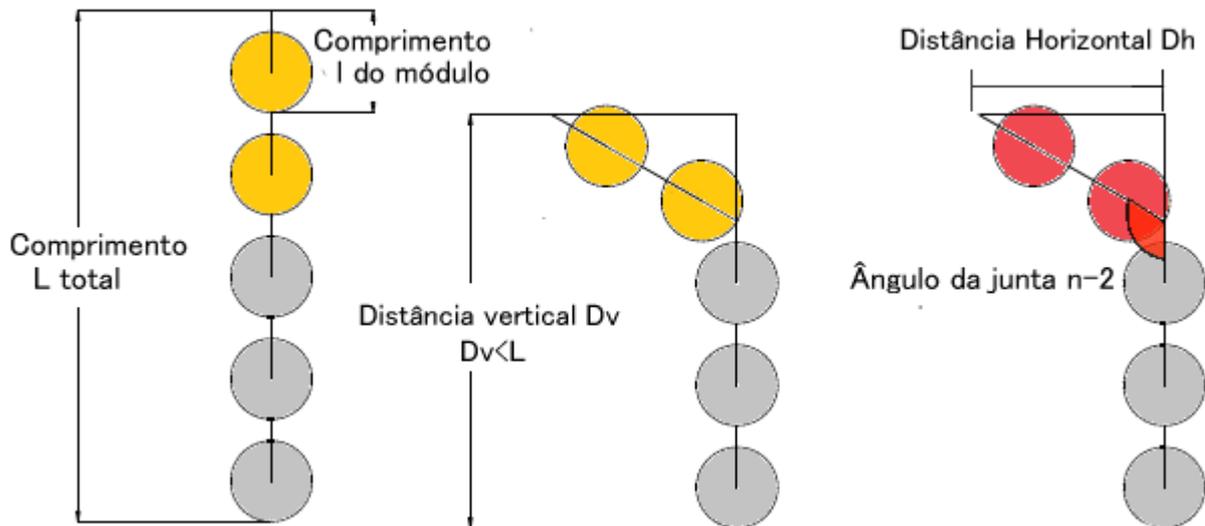


Figura 26: Alteração de posição relativa durante movimento. Como visto, a alteração de ângulos muda a distância relativa entre dois pontos, porém de modo mensurável

Da mesma forma, sabendo a massa e as características dos componentes de cada módulos, é possível prever seu gasto energético e desempenho teórico, permitindo observação quanto a presença de alguma força que altere os resultados teóricos, a qual poderia ser medida por um *filtro* do próprio robô, capaz de analisar suas condições de movimento. Esse *filtro* trata-se da rotina de calibragem. Contudo, para que esta seja possível, assim como no caso das curvas cobra, deve-se primeiro ser capaz de desenvolver uma relação entre causa e efeito, ou entre coordenadas individuais e posição no espaço.

7.2.1 Ponto de Atuação

Partindo da hipótese que o robô conhece as posições $M(x,y,z)$ de todos os seus módulos, o que falta para definir a diferença de posição é a possibilidade de determinar o ponto $M(x,y,z)$ real. Um meio de fazer isso seria com uso de sensores ou equipamentos capazes de fornecer informações de distância entre dois pontos.

Um dos problemas mais óbvios deste método é a dependência da medição da precisão dos equipamentos utilizados. Seja α o ângulo máximo de atuação em qualquer

Âncora N_{i-1}	Atuador N_i	Atuado N_{i+1}	Condições
Pitch	Yaw	Pitch	Não pode ser alcançada com apenas três módulos se N_i pedir contato de escamas com o solo
Eixo Y	Eixo Z	Eixo Y	Módulos anteriores e posteriores terão resistência de junta, porém não estarão com as escamas em contato com o solo
Pitch	Yaw	Yaw	Pode ser alcançada com apenas três módulos
Eixo Y	Eixo Z	Eixo Z	Módulo anterior terá resistência de junta e de contato, porém módulo posterior terá apenas resistência de contato

Tabela 5: Análise sobre ângulos de atuação para três módulos sequenciais quanto à calibragem tendo por referência os modelos VDM apresentados na Seção 8.2

direção. No caso de um sensor Ultrassônico JRT com precisão de 1mm, considerando que apenas a junta n seja atuada e que $\alpha = 30$, a diferença entre as distâncias originais e atuadas é de 6,7%. Ou seja, se L for igual a 100 mm, o sensor terá um espaço de 6,7 mm para analisar - menos de sete vezes sua precisão. Supondo agora que a junta $n-1$ seja atuada. Neste caso, a diferença aumenta para 9%, o que torna a situação mais favorável à análise.

A solução, entretanto, não se limita a aumentar o número de módulos atuados durante a calibragem - a relação entre módulos e erro não é necessariamente linear: há de se considerar que o atuador não mais estará sendo responsável pelo movimento de um módulo, mas de dois, aumentando o efeito do atrito pelo aumento de massa. E no caso de dois atuadores funcionarem para garantir um espaço de análise maior, tem-se uma propagação de erros por módulo enquanto os atuadores não conseguirem se manter completamente imóveis durante o movimento.

Uma possível solução para aumentar o número de módulos a serem atuados por um mesmo atuador de potência compatível diminuindo o erro do próprio atuador é intercalar os sentidos destes, conforme apresentado na Tabela 5.

7.2.2 Relação Entre os Sensores

A calibragem depende da observação de diferença entre o resultado teórico esperado e o resultado prático obtido. A parte teórica é obtida em acordo com a massa dos módulos, seus ângulos de atuação e as características de seu atuador, enquanto a parte prática depende de todos esses fatores com a adição de elementos externos, sendo o aqui de interesse o atrito.

Em qualquer caso, conforme já discutido no Capítulo 6, um elemento de caráter dinâmico deverá ser mantido constante, seja este o torque do atuador ou a velocidade

observada pelo conjunto de módulos, de preferência analisada com referência ao centro de massa do dito conjunto. Porém, como discutido no Capítulo 6, a avaliação via velocidade constante exige mais elementos e envolve maior propagação de erro. Assim, será aqui considerado o caso de torque constante.

Seja o torque escrito como $\tau = F.r.\text{sen}\alpha$, onde α é o ângulo de bloco composto por todos os n módulos atuados na rotina e r o braço do centro de massa de interesse. Nesse caso, a calibragem deve seguir conforme listado.

1. Devem ser definidos dois pontos de referência ao longo da curva do robô para serem utilizados como referência, aqui chamados pontos Cd e Cb, conforme Figura 27. Um dos pontos deve necessariamente estar contido no conjunto de módulos atuados, enquanto o outro deve estar fora deste
2. O robô deve avaliar a distância entre os pontos Cd e Cb em linha reta antes do início da rotina e a armazenar
3. Executa-se movimentação de ângulo β na junta de interesse que movimenta o bloco, mantendo-se o torque constante com $\tau = \tau_{\text{teórico}}$, com $\tau_{\text{teórico}}$ sendo igual ao torque mínimo para movimentação,
4. O valor do torque aplicado deve ser avaliado pelo próprio robô, o que pode ser feito relacionando a potência requerida com o torque executado, como discutido na Seção 6.3
5. Ao fim do ciclo de atuação, deve-se medir novamente a distância entre Cd e Cb
6. A diferença entre as distâncias deve então ser comparada
7. Voltar para posição inicial
8. Repetir procedimento para $-\beta$
9. Comparar resultados para os dois ângulos. Se a diferença entre estes for maior do que o erro estipulado, repetir procedimento
10. Se a diferença estiver dentro do erro, a informação deve ser inserida no modelo de atrito sendo utilizado

Com isso, são necessários dois sensores: um para avaliar o comportamento do torque no tempo e outro para medir a distância entre os pontos determinados. Ao contrário do caso de relação entre torque e velocidade, onde a velocidade depende do torque e da qualidade de aceleração do mesmo, quando se considera a distância essa necessidade de correlação pode ser relevada, facilitando o procedimento.

Entretanto, para que se possa obter dados confiáveis, principalmente quando o interesse está na distância entre pontos do robô, é ideal que apenas o bloco atuado

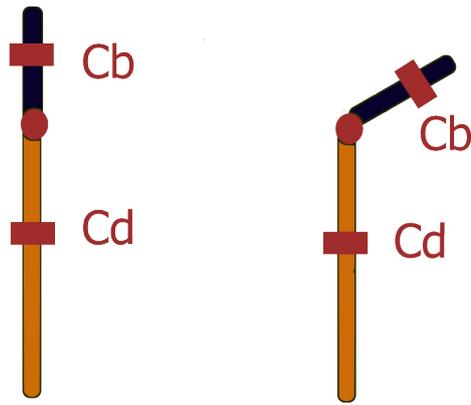


Figura 27: Dois pontos de referência para tomada de distância.

efetivamente se mova. A movimentação dos módulos fora do bloco pode acontecer por transmissão de força, conforme ilustrado simplificada na Figura 28.

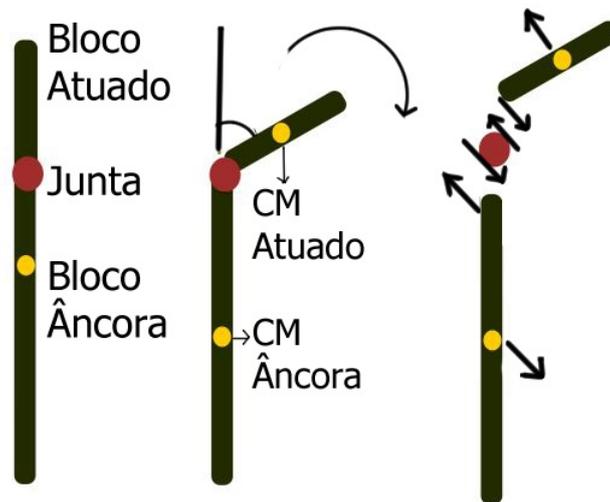


Figura 28: Transmissão de força devido à junta. A força de atrito observada no bloco atuado pode gerar deslocamento no restante do robô

Uma forma de se resolver essa questão é, mais uma vez, observando o comportamento das cobras durante sua locomoção, neste caso sobre a ótica de centro de massa a distribuição de peso.

7.3 Posicionamento e Âncora

Como visto na Seção 4.5, a movimentação das cobras não é consequência apenas de suas características morfológicas, como estilo e acabamento de suas escamas ventrais, mas também como o animal faz uso delas. Da mesma forma que os robôs cobra dependem de condições de equilíbrio e da capacidade de mudar seus pontos de contato, discutido na Seção 3.3, a cobra também o faz. Em verdade, assim como tudo o mais aqui discutido, ela

faz melhor, principalmente ao se considerar a condição de *sinus-lifting*, ou levantamento parcial do corpo em pontos de máxima curvatura.

A mesma lógica do *sinus-lifting* é vista em outras condições de deslocamento: o animal altera seus pontos de contato e a distribuição de peso ao longo da curva de seu corpo para alterar a influência do atrito de maneira dinâmica. De certo modo, esse sistema pode ser compreendido como um esquema dinâmico de pontos de âncoramento, onde os pontos de "âncora" não apresentam deslocamento lateral ou traseiro, facilitando a movimentação frontal.

Esse mesmo modelo de levantamento de pontos específicos pode ser periódico e distribuído em todo o corpo a todo momento. Ou seja, ao invés de ter diferentes comprimentos de arco de forma a manter partes de seu corpo mais contraídas e outras mais estendidas, gerando diferença de valor de s para pedaços da curva considerada, a cobra tem um único s em qualquer pedaço considerado, existindo apenas a distribuição de peso devido ao levantamento de certos pontos de seu comprimento.

Supondo agora que esses pontos não existissem, e que o atrito fosse dependente apenas das características da superfície ventral da cobra, a qual está em contato constante com o terreno de maneira igual. Simplificando a cobra para o esquema de módulos e juntas, conforme Capítulo 3. Todos os pontos da curva estão sujeitos às mesmas forças o tempo todo, o que por um lado facilitaria análise de todos os pontos da curva de maneira simultânea, mas torna o conjunto mais suscetível à estímulos aplicados de maneira individual.

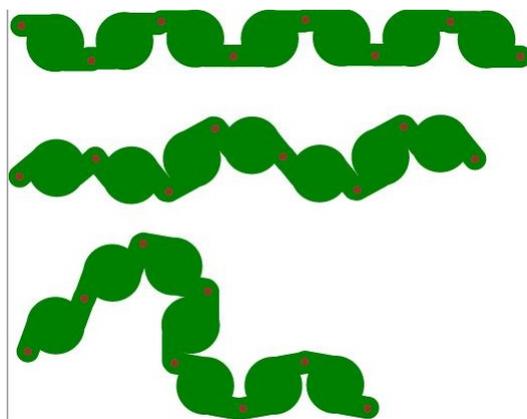


Figura 29: Três possíveis configurações de início para rotina de calibragem

Os três casos acima discutidos são apresentados na Figura 29, e permitem que se conclua três possibilidades de configuração inicial, antes do início da rotina de calibragem, as quais são discutidas na Tabela 6.

Independente da configuração considerada, todas tem seus resultados dependentes das características geométricas dos módulos, sobretudo seu comprimento l e seus ângulos de atuação. Módulos muito longos, por exemplo, exigirão uma curva muito aberta, tornando-a irrelevante na modelagem em termos de distribuição de peso, o mesmo va-

Configuração	Característica	Justificativa
Cobra Curvada	O robô atinge estado de parada, e então assume uma posição com todos os ângulos $\alpha_i = \alpha_i máx $, com direções variadas	Seguindo a lógica das cobras, ao se concentrar a massa total do robô em um ponto, os efeitos do atrito sobre a estrutura não envolvida na calibragem seria reduzida, permitindo uma análise mais segura -para o robô - e precisa
Cobra Longa Atuada	o robô apenas interromperia seu movimento independente da configuração de seus módulos ou posicionamento, e então realizaria a coleta de dados	É o ponto de início com menor gasto energético, sem envolvimento de uma etapa de pré-calibragem
Cobra Longa Linear	O robô atinge estado de parada, e então aciona-se os atuadores de modo que ele fique linear, $\alpha_i = 0 \forall i$	Não envolve a adição de nenhuma configuração ao robô, apenas um posicionamento específico dentro de seus limites de forma a eliminar uma parte de influências externas durante a calibração

Tabela 6: Possibilidades de configuração inicial assumida pelo robô

lendo para ângulos de atuação muito limitados, os quais exijam um grande número de módulos para se fechar um arco.

Usando pontos de posição baseados nas curvas cobra apresentadas no Capítulo 3, e as limitações geométricas observadas nos modelos VDM, além dos resultados quanto à anisotropia e expectativa de atrito discutidas no Capítulo 9, é possível comparar as três condições iniciais de forma teórica a fim de decidir qual seria a mais adequada para a rotina de calibragem.

7.3.1 Distribuição de Massa

Em escala macroscópica, o atrito depende da força normal entre as superfícies de contato e das características geométricas destas, como rugosidade. Com isso, o ponto de maior atrito em um robô de movimentação ápole e característica modular será aquele mais próximo do centro de massa do robô que caracterize um ponto de contato. Isso também significa que é possível mudar a força de atrito ao longo do robô mudando seu centro de massa.

A rotina de calibragem pede a divisão do robô em blocos, os quais serão daqui em diante denominados bloco atuado B_n e Bloco de Âncora B_a , de forma que sendo N o

	Linear		Atuado		Âncora	
CM total (x,y)	117.5000	12.9904	94.8008	20.9453	50.8103	24.4809
CM ancorado (x,y)	87.5000	0	69.1942	11.3642	35.3553	12.6269
CM atuado (x,y)	187.5000	43.3013	154.5495	43.3013	86.8718	52.1401
Distância (Bn,Ba) [mm]	108.9725		91.1346		64.9249	

Tabela 7: Comparação entre coordenadas e distâncias dos centros de massa para os três casos iniciais considerando módulos VDM

número total de módulos, $N = Bn + Ba$. Assim sendo, tem-se três centros de massa de interesse, o total e os dos blocos.

A distribuição de massa ao longo da curva é dada pela posição do centro de massa dos módulos individuais, o que pode ser facilmente determinado dentro de um plano (x,y) com base nos ângulos de bloco α_i e junta ϕ_i . Será suposto que o centro de massa de cada módulo é tal que para o início do módulo (0,0), $(X_{cm}, Y_{cm}) = (l/2, h/2)$. Como visto no Capítulo 8, todos os três módulos foram pensados de forma que possuam centro de massa alinhados e mesmas dimensões, então podem ser considerados neste caso sem necessidade de ajustes.

Supondo que a cobra em qualquer movimentação resultante de combinação *pitch* e *yaw* esteja no meio de seu deslocamento seguindo alguma curva cobra e pare ao fim de um ciclo mantendo seus últimos ângulos de atuação. O centro de massa da curva está em $S/2$. No caso da cobra em posição linear, o centro está em $L.N/2$. Agora, caso o robô entre em situação de âncora, comprimindo parte de seu corpo e estendendo o resto, a posição do centro de massa passa a depender da forma geral da seção comprimida, incluindo o número de módulos que a compõe, o ângulo de compressão e o número de voltas. Na Figura 30, pode-se observar a forma das três condições no espaço antes e depois da realização do ângulo de atuação para calibragem, sendo que nesta o ângulo β foi de 60° .

Pensando que a força de atrito transmitida pela conexão entre Bn e Ba atue em seus centros de massa respectivos. Em Bn, o atrito tem característica dissipativa porém em Ba, o atrito pode gerar um deslocamento dos módulos no mesmo sentido do ângulo β , o qual se agrava com o distanciamento entre o centro de massa de Ba e Bn, assim como com a distância entre ambos e o ponto do atuador na curva, posto que todas essas distâncias podem atuar como braços da modelagem física. Pensando no caso geral, o ideal é que essas distâncias sejam mínimas, o que corresponde à condição de âncora inicial, conforme demonstrado na Tabela 7.

Porém, o centro de massa calculado pode estar fora da curva, como mostrado na Figura 31, o que por si não invalida os resultados apresentados anteriormente mas, ao se pensar no atrito como um fenômeno dependente do contato entre duas superfícies, dá margem à questão da distribuição de massa observada em cobras não apenas pela característica curva que seu corpo assume durante o movimento, mas também pelo levantamento

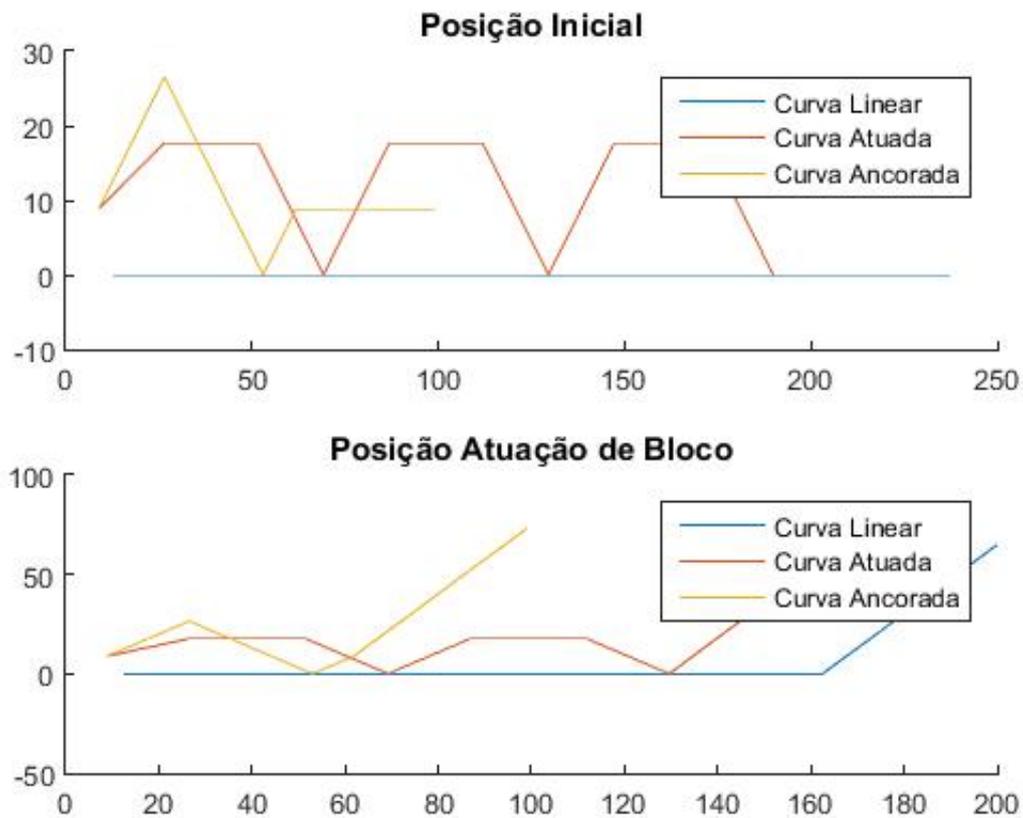


Figura 30: Curvas representando os três tipos de posições de pré-calibragem, para $N=10$ e $n=3$

de partes deste, tanto mudando os valores do centro de massa quanto gerando pontos de contato e de afastamento dinâmicos.

A aplicação adequada desses conceitos, ao ponto de permitir ao robô compor hipóteses sobre o terreno no qual se desloca pode ajuda-lo a mapear o local, característica útil em casos de destroços por exemplo. Contudo, isso depende do quão bem os modelos de atrito, controle de movimentação e sistema de sensores funcionam no dado contexto.

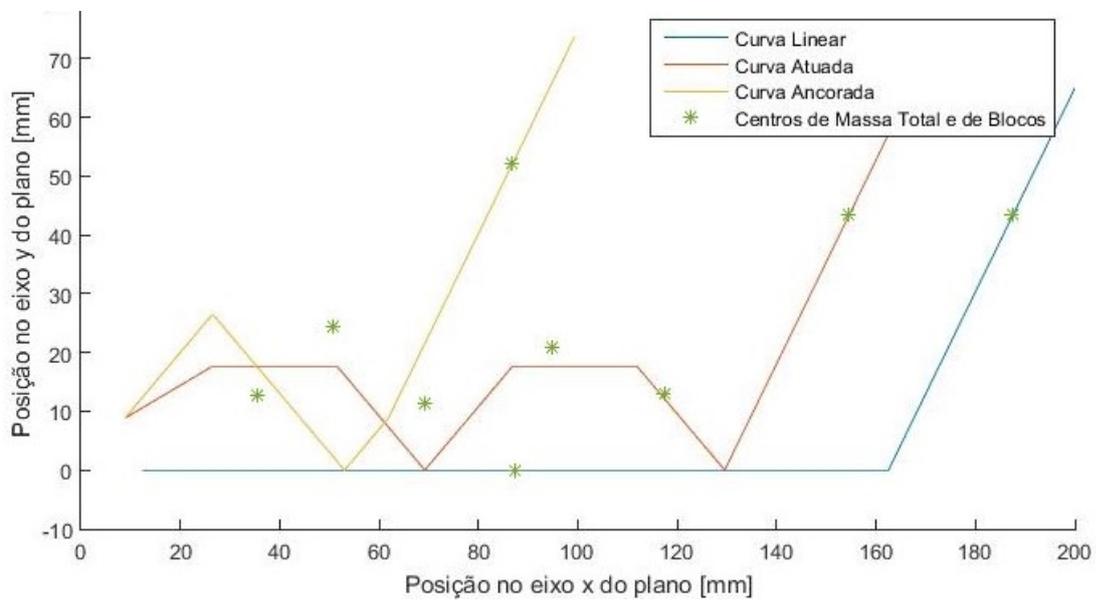


Figura 31: Curvas no espaço e seus centros de massa

8 Protótipo de validação: Série VDM

Idealmente, a rotina de calibragem aqui proposta deve ser tão geral quanto possível, permitindo sua aplicação em diversos tipos de robôs com característica modular e movimentação ápole baseada em cobras. Contudo, para que se pudesse observar da melhor forma a validade da rotina, foram planejados testes controlados nos quais fosse possível obter velocidade e deslocamento de uma superfície anisotrópica em um caso real e reproduzível. O planejamento de tal superfície envolveu o desenvolvimento conceitual de um novo robô modular denominado VDM, o qual serviu aqui tanto para considerações de movimento e comportamento quanto como um resultado das discussões apresentadas ao longo deste trabalho sobre modularidade e biomimética.

8.1 Estruturas Externa e Interna

O primeiro ponto considerado é o aspecto externo do módulo individual e suas características. Quanto à armadura, o fato da estrutura ser total ou parcialmente não afeta a modelagem, mas dá-se preferência à fechada, em estilo similar ao de alguns robôs da série ACM, (YAMADA; TAKAOKA; HIROSE, 2013). O fim de tal decisão é trazer ao módulo algum nível de resistência à água, posto que os robôs são direcionados a exploração de escombros, além de dificultar o acúmulo de resíduos nos sistemas de alimentação e controle.

Em termos do formato da armadura, o único requisito é de que os pontos de conexão sejam alinhados paralelamente, de forma que o robô possa se encaixar na definição de um mecanismo ACM. Pelo mesmo motivo, a geometria dos mesmos deve poder ser encapsulada numa forma cilíndrica ou quadrática passível de encaixar-se na *corda*, para permitir que os princípios e definições referentes à movimentação cobra apresentados no Capítulo 3 sejam válidos.

Seguindo pelas limitações da condição cobra, os módulos são responsáveis pelo movimento do robô tanto quanto as vértebras de uma cobra, com as juntas representando a movimentação muscular do animal. Assim sendo, cada módulo deve ser tal que possa

realizar as atuações devidas independentemente, gerando ângulos de junta e de bloco condizentes com a simulação esperada. Para tal, a estrutura interna deve conter no mínimo: Sistema de alimentação (independente ou não) para os componentes eletrônicos e de atuação; Sistema de Controle, para as juntas; Sensores de movimento, para obtenção de dados em tempo real do robô.

Já estabelecida a importância do centro de gravidade de cada módulo e de seções da curva na Seção 7.3, a disposição dos equipamentos internos deve estar alinhada de tal forma com a geometria da armadura que os centros de gravidade e massa se alinhem. Tal requerimento visa facilitar as simulações, ao tornar desprezíveis desequilíbrios causados por um desalinhamento entre estes. Portanto, um módulo com espaço extra que permita diferentes combinações de posição dos componentes internos além da adição de lastros para compensação é preferível.

Outro requerimento quanto à geometria externa da armadura e o posicionamentos dos elementos internos, sobretudo os responsáveis pela atuação dos módulos, é que o conjunto destes permita ângulos de bloco e de junta com os maiores valores possíveis sem que se perca a característica ACM. Ainda que as curvas de movimentação em si não exijam a execução de ângulos muito abertos, tal característica é desejável para a organização do robô em condição de âncora durante a sua calibragem. Quanto maiores os ângulos de junta, menos módulos são necessários para uma âncora efetiva, conforme demonstrado na Figura 32

Por fim, independente da geometria escolhida e da disposição dos componentes, o módulo deve suportar a presença de pelo menos uma superfície de atrito anisotrópico que simule as escamas de uma cobra, em acordo com o discutido na Seção 4.5.

8.2 Série VDM

É proposto que a geometria seja irrelevante. Assim, considerou-se apenas que ela deva ser suficiente para abrigar

- Atuador com um braço conhecido
- Estrutura interna para alocação de componentes
- Armadura com superfície plana que suporte placa de atrito anisotrópico

Como comentado na Seção 2.2, a equipe EREKO, da Universidade de Brasília tem um histórico de quase 10 anos em estudos de robôs modulares reconfiguráveis, o quais serviram de base para a criação da geometria de armadura do protótipo de validação.

A configuração da série de robôs Ereko do α até o Sigma Lily é bem similar e baseia-se na movimentação pitch-pitch. Sua estrutura é aberta, como mostrado em 33

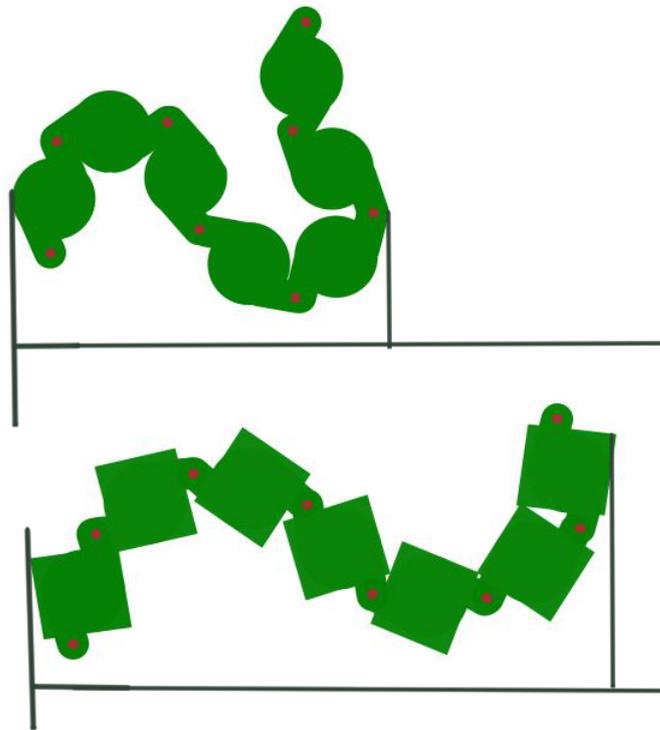


Figura 32: Comparação entre duas curvas com ângulos de atuação máximos diferentes. Pode-se perceber que o comprimento S da curva com módulos arredondados é menos do que dos retangulares, permitindo uma maior concentração de massa

com conexão feita por superfície e braço de junta atuado. Nenhum dos robôs da série foi capaz de realizar movimentação *yawn-yawn* ou *pitch-yawn*. Todas as tentativas resultaram ou em insuficiência dos atuadores ou na falta de limitação de movimentação lateral, de modo que em posição *yawn-yawn* o robô apenas movimentava seus atuadores sem qualquer avanço.

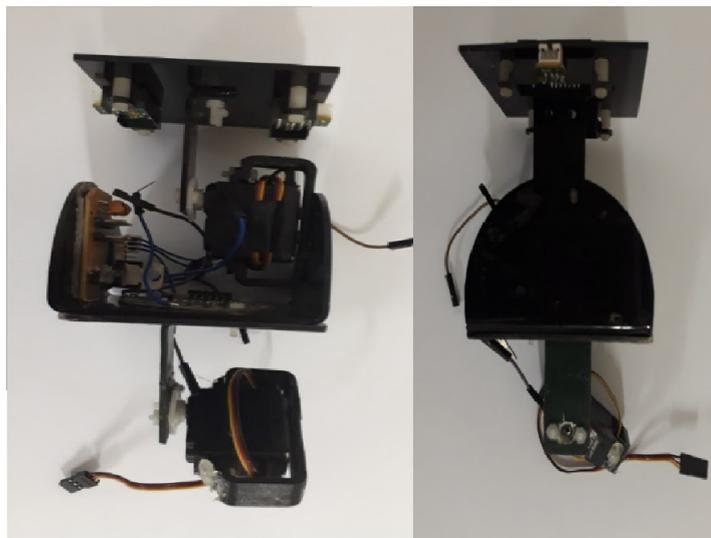


Figura 33: Estrutura do Módulo Sigma-Lily

A mudança entre configurações seria feita desconectando os robôs e girando-os,

como sugerido na figura 34. Ainda que essa possa parecer uma solução suficientemente prática, ela não só impede a possibilidade de auto-reconfiguração - posto que o módulo, de seção transversal quadrada e sem atuadores rotacionais, não seria capaz de girar sozinho - como se mostrou insuficiente. Não foram feitos estudos para se determinar exatamente o porquê do Lily ser incapaz de se movimentar com a nova configuração, mas teoriza-se que o fato é resultado tanto da distribuição desigual de peso quanto da ausência de característica anisotrópica no atrito das superfícies.

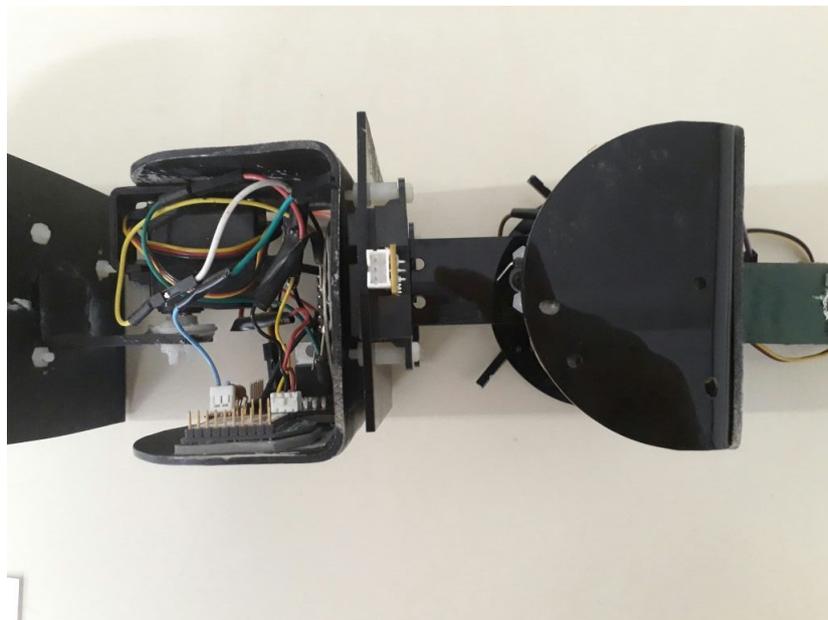


Figura 34: Módulos Sigma-Lily conectados. A mudança de composição deve ser feita manualmente.

Em 2015, surgiu o design denominado NEKE, de formato cilíndrico e alongado com as extremidades arredondadas. O design não chegou a fase de protótipo, pois análises em simulação denunciaram sua falta de estabilidade tanto estática quanto dinâmica e a impossibilidade de adicionar uma superfície de atrito, mas a discussão que ele trouxe se tornou um grande ponto de apoio no desenvolvimento da série VDM. O ponto mais relevante deste modelo foi a alternância no sentido dos atuadores, como indicado na Figura 35, permitindo ao robô realizar movimentação *pitch-pitch* e *yawn-yawn* com acionamento alternado ou *pitch-yawn* em geral.

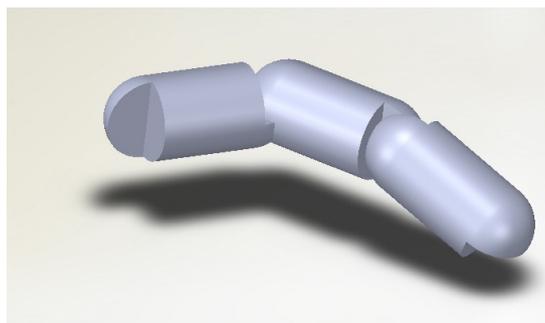


Figura 35: Simplificação do robô com módulos NEKE

Em 2016, foi desenvolvida uma nova geometria similar ao modelo NEKE, porém com seção transversal hexagonal. Foram feitas tentativas de aumentar o coeficiente de atrito em parte da estrutura usando o fator de rugosidade - com auxílio de uma folha de lixa, como mostrado na Figura 36.



Figura 36: Protótipo de seção transversal hexagonal.

Por fim, analisando os resultados passados, chegou-se à estrutura proposta ao protótipo VDM, indicada na Figura 37. As duas configurações são denominadas VDM-Y e VDM-T, Módulo de Movimentação e Transição, respectivamente. Esse resultado foi uma mistura dos preceitos do NEKE, quanto à alteração do sentido de atuação, do modelo hexagonal, em não fazer uma seção transversal circular, e da série Ereko, permitindo a mudança de direção de movimento com o uso de um módulo rotacionado - ou uma estrutura não - atuada responsável.

Por fim, tem-se o VDM-C, no caso, os modelos heterogêneos de Cauda e Cabeça. Suas principais diferenças são o tamanho e o fato de possuírem apenas uma estrutura de junta. Sua aplicabilidade depende do sistema de calibração selecionados mas, tanto quanto firmam a proposta de reconfigurabilidade de um robô modular, eles poderiam carregar mais sensores em sua carcaça.

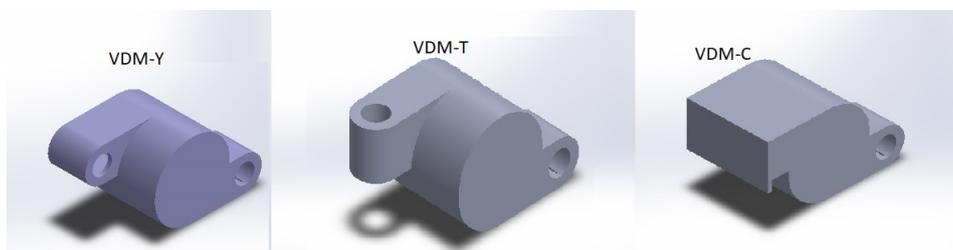


Figura 37: Os três estilos de Módulos VDM propostos

Assim, as configurações possíveis para o robô Valdemar seriam: apenas módulos VDM-Y, para movimentação lateral concertina, indicado em 38; VDM-Y com VDM-T, para movimento pitch-yawn, mostrado na Figura 39; Módulos VDM-Y com mínimo de dois módulos VDM-C. A principal vantagem de se propor diferentes configurações de robô é poder ampliar o raio de possibilidades de análise de calibragem - além de garantir que esta possa ocorrer para robôs com diferentes Passos.

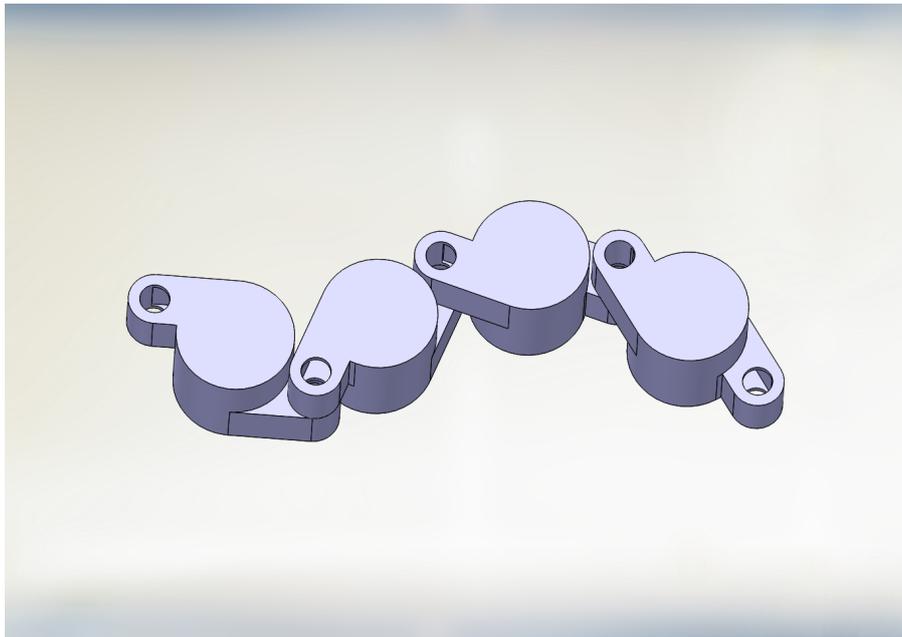


Figura 38: Robô de composição Homogênea com VDM-Y

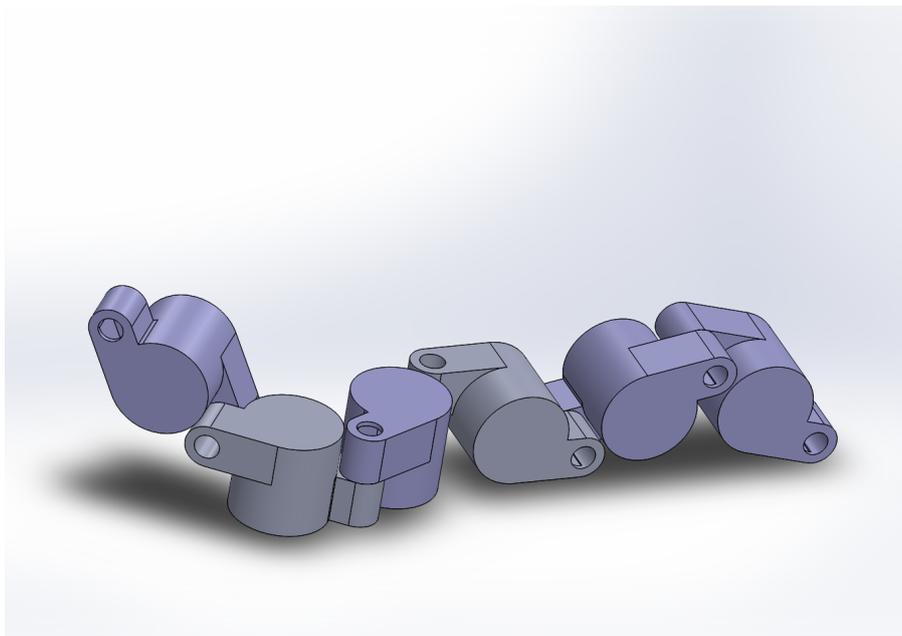


Figura 39: Robô de composição Heterogênea com VDM-Y e VDM-T

Ainda que o módulo seja de estrutura fechada, seus componentes internos devem ter fácil acesso, para manutenção e mudança de configuração em geral. Assim, sugere-se um sistema de tampa com fecho em madeira ou rosca impressa em 3D, separando o módulo em suas metade, similar ao que é mostrado na Figura 40.

Além disso, os módulos devem possuir uma estrutura de escamas em ao menos duas de suas faces, as mais relevantes durante movimentação com componente *yawn*. Assim como nas cobras, as escamas falsas deverão inserir um fato anisotrópico ao robô, permitindo que este reproduza movimentações de ondulação lateral mesmo sem uso de rodas.

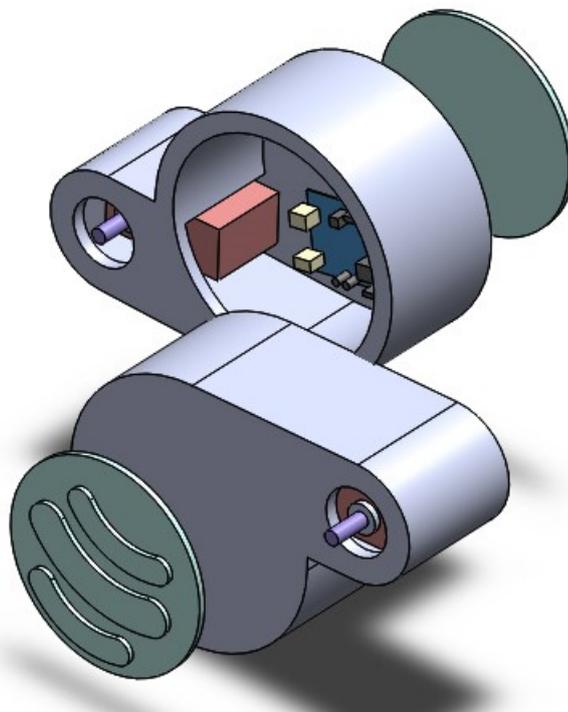


Figura 40: Composição Do Módulo VDM, com dois atuadores, estruturas de escama e sistemas de alimentação e controle

9 Protótipos de Superfície Anisotrópica

Até o momento, foi apresentado um conceito geral sobre superfícies anisotrópicas baseadas em escamas de cobras, sendo todas as informações são de base teórica. Em vista do modelo de robô modular aqui desenvolvido (série VDM), o qual supõe uso de elementos capazes de reproduzir características anisotrópicas de atrito, são discutidos neste capítulo os fatores que envolveriam a manufatura de uma placa que supra tal necessidade. Entre os pontos de interesse estão o grau de anisotropia observável e o que o influencia em termos de geometria.

Serão considerados dois conjuntos de protótipos, aqui chamados Alpha e Beta. A série Alpha foi planejada como objeto de estudo para testes voltados ao sistemas de escamas que se deseja implementar no VDM, abordando tanto as características geométricas dos ressaltos - aqui denominados cerdas - em relação à uma base, a qual tem dimensões limitadas pelo projeto dos módulos VDM, quanto à adequação do uso de máquinas de prototipagem rápida em sua manufatura. A série Beta deve ser compreendida como o resultado final dos testes realizados com a Alpha, se tratando então de uma sugestão do que seria um primeiro modelo ideal de superfície anisotrópica artificial em termos de geometria.

A principal razão para separação do desenvolvimento em duas etapas se dá pela mesma linha de raciocínio apresentada ao longo das demais fases deste trabalho: análise de aspectos em separado a fim de se obter uma análise individual dos possíveis erros relacionados, além de uma percepção melhor da influência de cada característica dentro do todo, e de como a junção destas afeta o desempenho do protótipo.

9.1 Acabamento superficial

A parte mais importante da criação da superfície anisotrópica é encontrar o equilíbrio entre uma reprodução mais fiel às escamas biológicas e a relação de eficiência nos testes de atrito em relação aos processos de manufatura. Na Seção 4.5.1, discutiu-se sobre o formato geral e sobre as divisões das escamas ao longo do corpo das cobras, principal-

mente na região ventral - que se mantém em contato com a superfície pela qual o animal se desloca. Entretanto, a forma geral das escamas ventrais é apenas o primeiro nível na questão de anisotropia da superfície das cobras. Ainda em (BERTHÉ et al., 2009), há a questão da *micro-superfície*: não só a geometria macroscópica das escamas muda de acordo com o posicionamento destas no animal, mas também suas características microscópicas.

Em seu trabalho sobre o comportamento do atrito na superfície anisotrópica das cobras, (FILIPPOV; GORB, 2016) traz a questão dos microdermatoglitos (*Microdermatoglyphes*), ou seja, uma nano-estrutura superficial observável nas escamas ventrais de cobras e que contribui para a rugosidade natural do animal, conseqüentemente influenciando suas interações de atrito com o ambiente. Em verdade, o trabalho discute sobre como diferentes espécies de cobra podem apresentar diferentes orientações de escamas ventrais e microdermatoglitos a depender do ambiente em que vivem.

Entre as características comuns encontradas entre as cobras durante experimentos citados no artigo, tem-se:

- Anisotropia mais notável em terrenos de maior rugosidade;
- Coeficiente de atrito menor na direção do crânio do que da cauda;
- Dois níveis de anisotropia: macro e micro, representados pelas escamas e pelos microdermatoglitos;
- microdermatoglitos, também chamado de micro-ornamentos na literatura, com formato de presas e orientados paralelamente à direção longitudinal do corpo da cobra.

Os resultados obtidos no trabalho de Filippov advêm de simulações numéricas baseadas em experimentos com cobras anestesiadas e no modelo de atrito em nano-escala de Tomlinson-Prandtl, não sendo citado nenhum teste experimental com estruturas feitas artificialmente.

Assim, uma referência melhor quanto ao acabamento superficial é (BAUM; HEPE; GORB, 2014), onde foi testada uma série de micro-estruturas, sendo a de maior interesse para este trabalho a Micro-estrutura Polimérica Inspirada em Cobras (*Snake Inspired Microstructured Polymer Surface - SIMPS*) baseada na morfologia das escamas ventrais da *L.g. californae*. Conforme os resultados do trabalho original de Baum, a micro-estrutura SIMPS foi a que apresentou melhores resultados em questões anisotrópicas, e que melhor se encaixa na ideia de micro-presas.

9.2 Elaboração da Série Alpha

Para se definir o número N de protótipos Alpha a serem produzidos, foi utilizada a proposta de design factorial, tendo por referência (BOX; HUNTER; HUNTER, 2005).

Com isso, N é dado por uma relação entre os I aspectos considerados e os J níveis que estes podem assumir, de forma que $N = J^I$ abrange todas as possíveis combinações. Por exemplo, a existência de relevos hexagonais na superfície do módulo é um aspecto, e o espaçamento entre estes, seu tamanho e densidade seriam possíveis níveis a serem considerados, conforme indicado na Figura 41. É preciso também ter em mente as respostas desejadas, para se poder relacionar um resultado com seus respectivos aspectos e níveis de forma adequada. No caso, os protótipos devem ser capazes de reproduzir uma superfície com características anisotrópicas quando analisado por ponto de vista dinâmico.

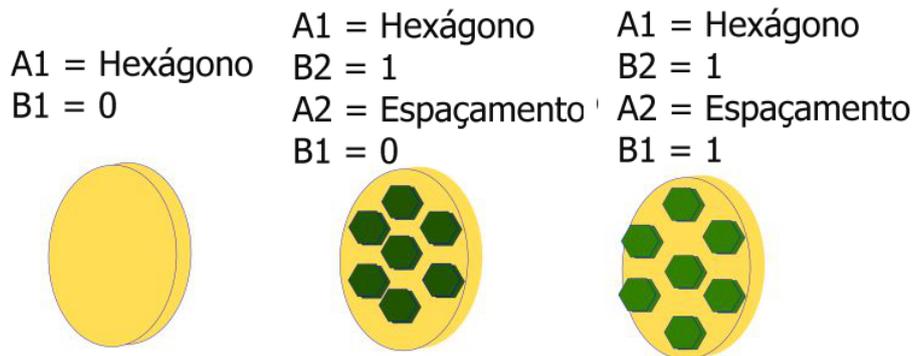


Figura 41: Exemplo de 5 placas com diferentes relações entre aspectos e níveis, sendo os aspectos a presença de ressalto hexagonal, espaçamento e altura dos ditos ressaltos, todos com dois níveis.

A série Alpha lida com duas questões: disposição de "escamas" e acabamento superficial destas, com base no discutido na Seção 4.5. A maior inspiração neste quesito advém dos trabalhos apresentados em (JAYME, 2016) e (SERRANO *et al.*, 2015). Ambos trazem como resultado principal geometrias diferentes, sendo o formato de escama de Jayme curvado no sentido horizontal com textura superficial e o de Serrano *et al.* curvado em meio-circulo no sentido vertical, de forma similar aos microdermatoglitos discutidos em (FILIPPOV; GORB, 2013), conforme indicado na Figura 42.

Decidiu-se por testar uma geometria que misturasse ambas as características, de forma que as placas da série Alpha são compostas por três elementos: pele, escamas e microdermatoglitos, conforme Figura 43. A pele é a parte que será acoplada ao módulos. Tanto as escamas sozinhas quanto o conjunto de escamas e microdermatoglitos serão aqui chamados de "cerdas", baseando-se na nomenclatura usada no modelo de atrito de cerdas, (HAESSIG; FRIEDLAND, 1990). A "escama" também pode ser entendida como base, enquanto elemento sobre o qual os pseudo-microdermatoglitos (ou acabamentos superficiais) são depositados. Com isso a série Alpha foi dividida em duas categorias: Alpha-0 e Alpha-1, as quais divergem entre si quanto à composição de suas cerdas.

As placas do conjunto Alpha-0 não possuem os pseudo-microdermatoglitos, sendo suas cerdas compostas apenas pelas "escamas" base com geometria semelhante a de Jayme, porém com raio de curvatura menor. Esse conjunto possui duas placas: A0-0 e A0-1, as

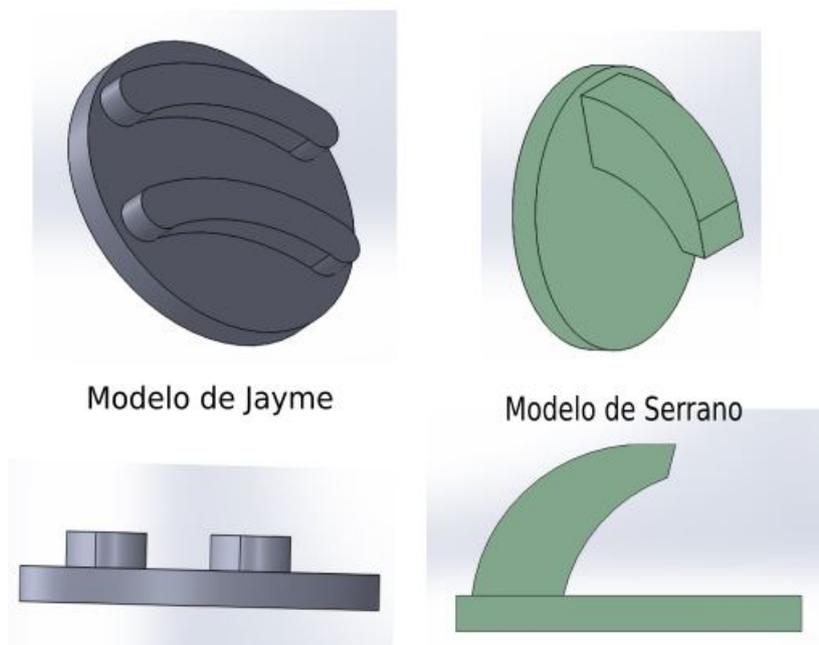


Figura 42: Exemplificação de estruturas utilizadas para reprodução de anisotropia



Figura 43: Nomenclatura das três partes que compõem a superfície de atrito discutida

quais foram desenvolvidas para uma primeira série de testes. O foco destes testes, cujos resultados são discutidos na Seção 9.3, foi observar se a simples disposição dos ressaltos - com ou sem angulação perpendicular - já seria suficiente para mudar a característica de atrito entre duas ou mais direções da placa de maneira perceptível.

Em seguida tem-se o conjunto Alpha-1, com o acabamento superficial das escamas. Conforme abordado na Seção 9.1, os microdermatoglitos são uma solução geométrica na reprodução da característica anisotrópica observada no ventre das cobras. Entretanto, se pensadas enquanto acabamento devem ter suas dimensões restritas às limitações for-

ncidas pelas máquinas de prototipagem rápida disponíveis. Também das máquinas de prototipagem rápida depende o terceiro ponto do qual são retirados **I** aspectos e **J** níveis: as características mecânicas da estrutura.

Além das características individuais de um material das quais obtêm-se uma estimativa de seu comportamento quando exposto a forças externas, como compressão e torção, no caso de estruturas feitas em prototipagem as características de manufatura (como espessura e geometria da camada) influenciam no comportamento do material como um todo. O resultado é que pode-se ter duas peças de densidades diferentes feitas no mesmo material conforme altera-se o estilo de camada de impressão. Assim, antes de seguir com a discussão do acabamento em microdermatoglitos, são apresentadas na Tabela 8 as especificações gerais das impressoras 3D consideradas neste trabalho.

Modelo	Área de impressão (mm)	Resolução da camada (mm)
DaVinci Pro XYZ printing	200x200x200	0.1-0.4
Little Monster TEVO	base circular 340x500	0.05-0.4
I3 MK3 Prusa	250x210x210	0.05

Tabela 8: Especificações básicas de impressoras 3D consideradas conforme dados apresentados nos sites de seus respectivos fabricantes, visitados em 2018

Como a impressão dos protótipos depende da disponibilidade das impressoras, serão consideradas as dimensões da DaVinci Pro, com uma precisão de 0.2 mm na espessura de camada de impressão e dimensão mínima em qualquer direção como 0.4 mm.

Definidas a forma geométrica da base dos microdermatoglitos e as dimensões máximas e mínimas a serem consideradas no protótipo, pode-se definir os *I* aspectos e *J* níveis a serem considerados durante o processo de manufatura da Série Alpha de forma a se obter o maior nível de anisotropia e simplificar os testes de atrito a serem realizados. As informações relevantes aos elementos de design dos protótipos Alpha são apresentados na Tabela 9.

Como os testes consideram diferentes aspectos e níveis, os resultados devem ser analisados com base nos valores médios individuais e valores médios correlacionados. Ou seja, o efeito individual de cada aspecto sob os resultados obtidos e o efeito médio com-

Aspectos	Nível Inferior	Nível Superior
Densidade da Base	Contornos da forma curva, apenas como apoio para o acabamento de superfície	Estrutura Sólida com espaçamento determinado apenas pelos parâmetros de impressão
Ângulo Midrodermatoglitos	Tal que a altura do acabamento seja 1 mm	Tal que a altura do acabamento seja de 4 mm
Distribuição Acabamento	Acabamento contínuo seguindo o contorno da base	Acabamento espaçado de forma uniforme ao longo da base

Tabela 9: Aspectos e níveis considerados para Série Alpha

binado de dois aspectos em um sistema tri-dimensional, como apresentado na Figura 44. Para obter resultados melhores, é necessária a realização de pelo dois testes para cada parâmetro ou seja o número de testes M é igual à $2N$, (BOX; HUNTER; HUNTER, 2005).

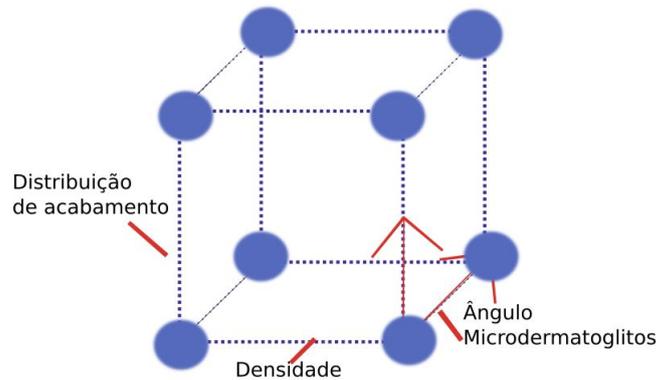


Figura 44: Cubo formado pelos três aspectos I (densidade, ângulo e distribuição) selecionados com dois Níveis J (máximo e mínimo). Cada aresta do cubo é um resultado possível.

Seja a base curva aqui compreendida como a camada-base equivalente ao conjunto pele-escama das cobras e os microdermatoglitós como a camada-irregular equivalente à micro-estrutura das escamas, em acordo com a Seção 4.5.2. A mudança de densidade da base visa lhe conceder uma característica mais maleável, enquanto a alteração do ângulo e altura do acabamento tem caráter mais exploratório, posto que não foram encontradas informações conclusivas quanto a este aspecto durante revisão bibliográfica. A diferença de espaçamento entre as estruturas de acabamento, conseqüentemente entre os pontos individuais de contato, também tem caráter exploratório, baseado na lógica de número de cerdas consideradas discutido em (HAESSIG; FRIEDLAND, 1990). Para todos os três aspectos foram definidos apenas dois níveis de máximo e mínimo, aqui considerado suficiente para exploração das características desejadas quanto à anisotropia. Com isso, de acordo com os princípios de design fatorial apresentados em (BOX; HUNTER; HUNTER, 2005), tem-se um número N de 8 (2^3) protótipos da Série Alpha a serem desenvolvidos e testados.

Contudo, após a impressão de uma placa de densidade mínima, a qual foi comparada com seu par de mesmas condições e densidade máxima, os quais podem ser vistos na Figura 45 em testes de papel milimetrado conforme descrito na Seção 9.3, concluiu-se que a densidade da parte impressa não influenciaria os testes. Então, decidiu-se por imprimir apenas placas de densidade mínima, enquanto apresentam menor consumo de material, menos tempo de impressão e cujo peso reduzido pode ser desconsiderado na análise da força de atrito, facilitando a comparação de placas puramente por duas características de forma.

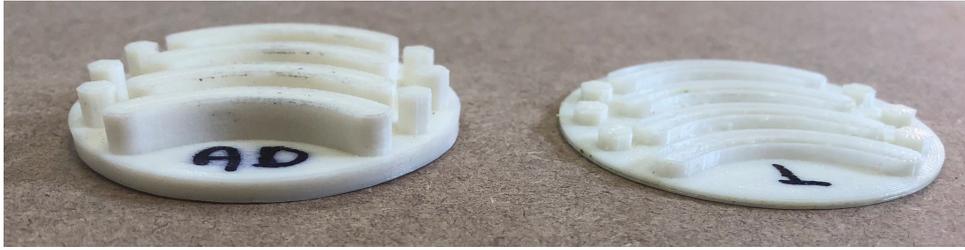


Figura 45: Comparação visual entre placas de máxima e mínima densidade

9.3 Testes Realizados com a Série Alpha

A fim de analisar a anisotropia das superfícies das placas da Série Alpha e o desempenho das mesmas quanto à reprodução do comportamento observado em uma cobra, decidiu-se por usar a metodologia do plano inclinado, sendo o ponto de maior interesse o fenômeno de escorregamento após se ultrapassar o ponto de ruptura, em acordo com o explorado na Seção 4.2. Conforme dito em (OLSSON, 1996), esse é o ponto, determinado neste caso pelo ângulo de inclinação, no qual se dá a separação entre os estados de adesão e escorregamento.

Para estes testes, usar o modelo de atrito de Coulomb será suficiente, posto que: não haverá mudança de direção do movimento ao longo da execução dos mesmos; diferentes ângulos θ_r de ruptura são provas suficiente de diferentes coeficientes de atrito; a observação de comportamentos diferentes, por tempo ou ângulo, em estruturas de mesmo material e confecção com acabamentos superficiais diferentes será suficiente para comprovação da efetividade dos acabamentos em situação dinâmica.

De acordo com (MARCO; TRINDADE, 2011), deve-se mudar as etapas relacionadas ao início do movimento conforme o coeficiente que se deseja obter: μ_a , enquanto coeficiente estático, tem por referência o último $\theta < \theta_r$, ou seja, antes do ponto de ruptura. Já μ_e , enquanto coeficiente de escorregamento bruto, é obtido com $\theta > \theta_r$ tal que, uma vez iniciado o movimento de forma manual, como empurrando o corpo pelo plano, o corpo escorregue com velocidade constante com o mínimo de ocorrências de deslizamento, porém sem tombamento do corpo. Porém, como o objetivo aqui não é a obtenção de coeficientes mas a observação de comportamento durante a transição de adesão para escorregamento, é suficiente determinar um ângulo de inclinação qualquer tal que $\theta > \theta_r$ para todas as placas, de forma que elas possam ser avaliadas diante das mesmas condições iniciais quanto à superfície de contato.

Outro ponto a ser considerado é como a massa dos protótipos influencia no resultado final posto que, devido às diferentes densidades, eles são sujeitos a diferentes forças peso. Considerando que o plano inclinado, para os fins aqui desejados, possa ser modelado como um equilíbrio de energias potencial e cinética, tal fato pode ser utilizado para que os resultados obtidos nos experimentos sejam tais que baseiem-se na superfície de con-

tato e não na massa. Com isso, diferenças de resultado que estejam dentro da diferença percentual de massa entre as placas serão consideradas irrelevantes.

Em todos os testes, para todas as placas, será seguida a mesma lógica quanto ao posicionamento destas no plano e quanto à forma como elas entrarão em escorregamento:

1. Serão consideradas três posições iniciais da placa: Positiva (P), Lateral (L) e Negativa (N), definidas em acordo com a orientação das escamas na parte ventral de uma cobra e com as indicações da Figura 46;
2. Soltar placa individual em plano inclinado na posição P com ângulo θ tal que $\theta = \theta_r$ e $v > 0$;
3. Determinar ponto de tomada de dados para o teste específico;
4. Repetir o processo para placa na posição L;
5. Repetir o processo para placa na posição N;
6. Repetir procedimento em todas as três posições para um ângulo θ_2 tal que $\theta_2 \neq \theta$ e $\theta_2 > \theta_r$, para observar a mudança dos dados de saída do experimento com base na entrada.

Os testes envolveram o uso de três materiais: cronômetro, papel milimetrado, tábua revestida por uma folha de cortiça e papel milimetrado. Decidiu-se por recobrir a superfície do plano inclinado com cortiça enquanto um material de rugosidade sensível em escala macroscópica porém não o bastante para desencadear pontos de adesão-escorregamento. Além disso, a cortiça se mostrou um material fácil de cortar e aplicar no plano de madeira, permitindo a troca de folhas durante os testes sem que esta trouxesse mudança nos resultados.



Figura 46: Placa $A0_1$ nos três sentidos usados para avaliação de anisotropia

9.4 Sobre o uso de ressaltos laterais: Série A0

Os primeiros modelos a serem submetidos à testes quanto ao comportamento de escamas foram os Alpha0, mostrados na Figura 47 a fim não só de avaliar o impacto da

superfície curva como a presença de ressaltos hexagonais no sentido lateral das placas, ressaltos estes derivados das escamas laterais em relação ao ventre das cobras, conforme Seção 2.1. Ambas as placas foram feitas considerando-se densidade máxima principalmente para lhes garantir mais resistência estrutural e peso, posto que foram usadas tanto para a análise dos ressaltos e da curvatura de base, como para a avaliação do funcionamento do plano inclinado em si, de forma que foram as placas submetidas ao maior número de testes.



Figura 47: Placas $Alpha_0$, idênticas senão pelos ressaltos laterais

9.4.1 Teste em Papel Milimetrado com Placas A0

Primeiro, foi realizado um teste a fim de comparar o desempenho das placas A0-0 (com ressaltos laterais) e A0-1 (sem ressaltos laterais), quanto à anisotropia e estabilidade no plano inclinado. Os componentes específicos do teste e os parâmetros de interesse são:

- Folha de cortiça com demarcação de ponto inicial, no qual a placa deve ser posicionada em acordo com o sentido (P,L ou N) desejado e no qual a placa será solta;
- Papel milimetrado localizado ao fim do plano inclinado, no qual será anotado o ponto de parada da placa. A distância entre o ponto inicial do papel milimetrado (fim da cortiça) e o ponto de parada da placa é o resultado de interesse neste teste;
- Câmera filmadora para registrar o comportamento das placas durante escorregamento. Isso inclui rotações durante o escorregamento tanto na cortiça quanto no papel.

Os resultados quanto à distância final e comportamento das placas são apresentados na Tabela 10. Tendo em vista que ambos foram produzidos na mesma máquina, com mesmos materiais e configurações, a diferença de massa entre os dois é de 5%, então diferenças de posição final ou de tempo de parada dentro desta faixa foram consideradas irrelevantes.

	Distância A0-0 P	Distância A0-1 P	Distância A0-0 L	Distância A0-1 L	Distância A0-0 N	Distância A0-1 N
Média Ponto de parada (cm)	30.34	32.15	31.17	31.14	29,13	31.91
Desvio padrão	0.95	0.95	0.75	1.25	1.10	0.71
Diferença	5.63%		0.10%		8.71%	
Desvios horários	40%	70%	0%	30%	70%	50%
Desvios anti-horários	0%	10%	40%	30%	0%	50%
Desvio Máximo (graus)	15	30	15	90	60	90

Tabela 10: Resultados para distância de parada com A0-1 e A0-0

Como pode ser observado, as diferenças entre as distâncias finais alcançadas com escorregamento a partir do mesmo ponto e com mesmas condições de início não chegaram à 10% e, no caso do sentido lateral L, a diferença entre as duas placas Alpha0 foi quase nula, o que poderia sugerir que a presença dos ressaltos laterais é irrelevante. Entretanto, a diferença no ponto de parada entre os sentidos A e C da placa A0-0 foi de 4%, o que pode parecer insignificante quando comparado à relação de 1:4 apresentada em animais, porém é uma porcentagem consideravelmente maior que os 0,7% da placa A0-1.

Uma explicação para este efeito pode ser dada pelo comportamento das placas durante o escorregamento pelo plano inclinado em termos de desvio angular entre os pontos inicial e final. Ambas as placas apresentaram desvios, o que é explicável pela tendência do corpo em se por em seu estado de menor energia, o que aqui seria compreendido como o escorregamento no sentido positivo, o qual teoricamente apresenta o menor atrito. Contudo, a placa A0-0 apresentou uma incidência de desvios inferior à A0-1 em todos os três sentidos de escorregamento, sendo a menor diferença no sentido Lateral (20%) e a maior no Positivo (40%). Tal fato pode ser atribuído às diferentes posições de centro de massa entre as placas, considerando seus desenhos conceituais feitos em software SolidWorks, porém ambas possuem desvio similar e que não bate com o comportamento observado durante o escorregamento.

Com isso, pode-se concluir que os ressaltos laterais trazem maior estabilidade às placas, diminuindo suas rotações e desvios de percurso, além de manter-se por uma parte maior do percurso no sentido desejado. Portanto, será aqui favorecida a implementação de ressaltos laterais na superfície anisotrópica.

9.4.2 Testes em Papel Milimetrado com Conjunto Bloco-Placas A0

Um segundo teste com a série A0 foi feito. Ambas as placas foram acopladas à um suporte em madeira com furo de profundidade inferior à altura das placas, como na Figura 48, do qual poderiam ser removidas e intercambiadas facilmente, de forma a diminuir interferência nos resultados pelo uso de diferentes suportes. Com isso, pode-se adicionar massa extra ao bloco, contando que respeitado o centro de massa igual em todos

os testes, para compensar a diferença de peso entre as placas devido à densidade.



Figura 48: Exemplo do conjunto formado por placa acoplada ao bloco de madeira

Considerando que o bloco pesa 50 g, e que as placas (ambas feitas em PLA, de densidade $1,24 \text{ g/cm}^3$), tem-se que o peso do bloco representa 80% do peso total do conjunto e com isso a diferença observável na força normal entre o estudo com as duas placas cai de 5% para 0,8%, permitindo uma análise mais adequada do efeito do acabamento geométrico de escamas.

Dessa vez, os testes foram feitos para três ângulos diferentes, todos tais que ao se soltar o conjunto bloco de madeira-placa, este entre em estado de escorregamento imediatamente. As distâncias finais alcançadas foram anotadas para todos os três sentidos e são apresentadas na Tabela 11.

Com a adição do bloco, houve um maior número de desvios para ambas às placas, o que se explica pela distribuição de peso do bloco em si, principalmente tendo em vista que os desvios padrões das médias de distância do ponto de parada não foram muito diferentes dos apresentados na Tabela 10. Além disso, as tendências, tanto quanto à ângulo de desvio quanto a sentido -horário ou anti-horário- se repetiram nas duas placas, o que também sugere a possibilidade de um erro experimental, como mau posicionamento do plano inclinado. Em verdade, o mais interessante dos resultados obtidos neste segundo teste foi observar as placas se comportaram para ângulos diferentes.

Em teoria, quando maior o ângulo, maior deveria ser a média dos pontos de parada observados, mas isso não aconteceu em todos os casos. Apenas a queda em sentido C teve comportamento esperado, porém esse sentido também apresentou um desvio médio das placas de 30 graus em todos os casos sempre no sentido horário. Além disso, conforme se aumentou o ângulo de queda, pode-se perceber um aumento no desvio padrão em quase todos os sentidos, o que em parte é explicado pelo salto acentuado que o bloco dá ao sair da cortiça, conforme Figura 49.

Em suma, a adição do bloco de madeira, enquanto lógico em teoria, trouxe resul-

Pontos de comparação	Sentido A0	Sentido A1	Sentido B0	Sentido B1	Sentido C0	Sentido C1
Inclinação de 40°						
Média	20,02	20,21	20,38	20,36	20,03	20,77
Ponto de parada (cm)						
Desvio Padrão	0,52	0,71	0,70	0,94	0,49	0,56
Diferença	0,92%		0,09 %		3,56 %	
Inclinação de 50°						
Média	22,70	22,42	19,71	21,56	21,03	21,55
Ponto de parada (cm)						
Desvio Padrão	0,93	0,47	1,38	1,78	0,54	0,58
Diferença	1,27%		8,58%		2,41	
Inclinação de 60°						
Média	22,47	23,25	19,48	20,38	22,97	23,58
Ponto de parada (cm)						
Desvio Padrão	0,88	0,96	1,69	1,61	1,01	0,69
Diferença	3,33%		4,38%		2,62%	

Tabela 11: Resultados obtidos com escorregamento em plano inclinado para série A0 acoplada à um bloco de madeira

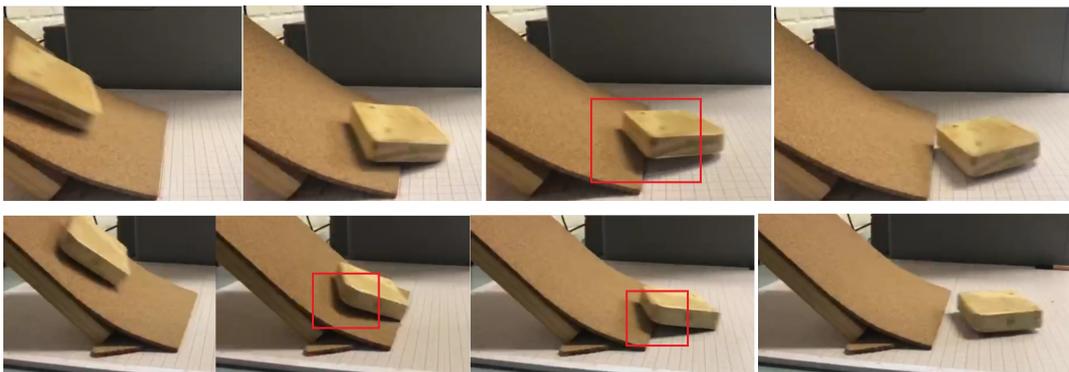


Figura 49: Descontinuidade no escorregamento do conjunto bloco-placa nos sentidos Positivo e Lateral.

tados inesperados na prática, e motivou um segundo tipo de teste, do qual serão retiradas informações que possam ser aplicadas nos modelos de atrito a serem estudados.

9.4.3 Superfícies iso e anisotrópicas: Testes com A0

Tendo em vista os resultados um tanto quanto inesperados na comparação entre as placas da série A0, foi realizado um novo teste com a placa A0-1, usando seus lados liso e com ressaltos. A motivação deste foi decidir se a presença do acabamento geométrico em semi-círculo realmente afeta o atrito durante a fase de escorregamento - e consequentemente, de adesão. Caso o resultado fosse negativo, isso implicaria que as diferenças observadas em papel milimetrado na comparação das duas placas da série A0 foram antes consequência de erros experimentais do que das geometrias utilizadas. Com isso, ao invés

Acabamento e Posição	Tempo Médio Escorregamento	Desvio Padrão	Comparação percentual Liso/Escama
Escamas A	0,32	0,02	-6,67
Liso A	0,34	0,02	
Escamas B	0,38	0,03	6,75
Liso B	0,34	0,05	
Escamas C	0,37	0,04	11,17
Liso C	0,34	0,05	

Tabela 12: Comparação de performance em plano inclinado do modelo $A0_1$ entre superfícies com e sem escamas

de se avaliar o ponto de parada, decidiu-se avaliar o tempo de escorregamento na cortiça, sendo as etapas específicas:

- Demarcação de ponto inicial P0 na cortiça, a partir do qual a placa é solta;
- Demarcação do ponto P2 na cortiça, onde se dá a tomada de tempo;
- A primeira tomada de tempo t_i se dá no momento em que a placa começa a apresentar deslocamento relativo ao plano;
- A segunda tomada de tempo t_f se dá no momento em que

A análise foi feita através de filmagens em câmera lenta junto à um cronômetro, onde a imagem capturada contém o plano inclinado, com duas marcações visíveis na folha de cortiça, e um cronômetro correndo ininterruptamente. Com isso, a observação das filmagens para um certo número de escorregamentos permite que se tenha informação de tempo, distância percorrida e desvios de trajetória sem mudança de característica de superfície de contato e sem saltos.

Nesses testes, a placa foi utilizada sem estar acoplada ao bloco de madeira, principalmente por se tratar da mesma placa para os dois testes e, portanto, não existir necessidade de reduzir efeito de diferença de peso e/ou distribuição de massa. Os resultados são apresentados na Tabela 12.

Durante o escorregamento com superfície lisa em contato com a cortiça, pode-se perceber que a placa manteve um tempo de queda uniforme em todos os três sentidos. Um comportamento esperado e que de fato se mostrou durante os testes foi uma tendência da placa em rotacionar até 90° quando no sentido Positivo, o que se explica pela presença dos ressaltos laterais hexagonais, os quais, por uma falha de desenho, acabaram por deslocar o centro de massa das placas.

Comparando os resultados das duas superfícies, pode-se perceber que a presença dos ressaltos realmente mudam o atrito em diferentes posições. Ainda que a forma dos ressaltos ainda não seja ideal, gerando diferença máxima de 11,17% em comparação a uma superfície lisa, esta não deve ser ignorada. Sobretudo ao levar-se em conta que o valor da

diferença lisa-escama mudou para todas as 3 posições de interesse, pode-se concluir que é possível inserir anisotropia no módulo de maneira simples e perceptível com a adição de acabamento em ressaltos inspirados na morfologia das escamas ventrais de cobras.

9.4.4 Plano Inclinado Com Tempo: Série A1

Baseando-se nos resultados discutidos na Seção 9.4, todos os módulos da série A1 possuem ressaltos laterais, variando entre si quanto ao ângulo dos microdermatoglitos e número de cerdas, como pode ser visto na Figura 50. Tanto nos desenhos quanto após a impressão, as placas da série A1 apresentaram diferenças volumétricas e de peso consideráveis, conforme sugerido na Tabela 13. Esse fato resultou em diferentes ângulos de inclinação θ_r entre elas, fazendo-se necessário uma compensação de massa.

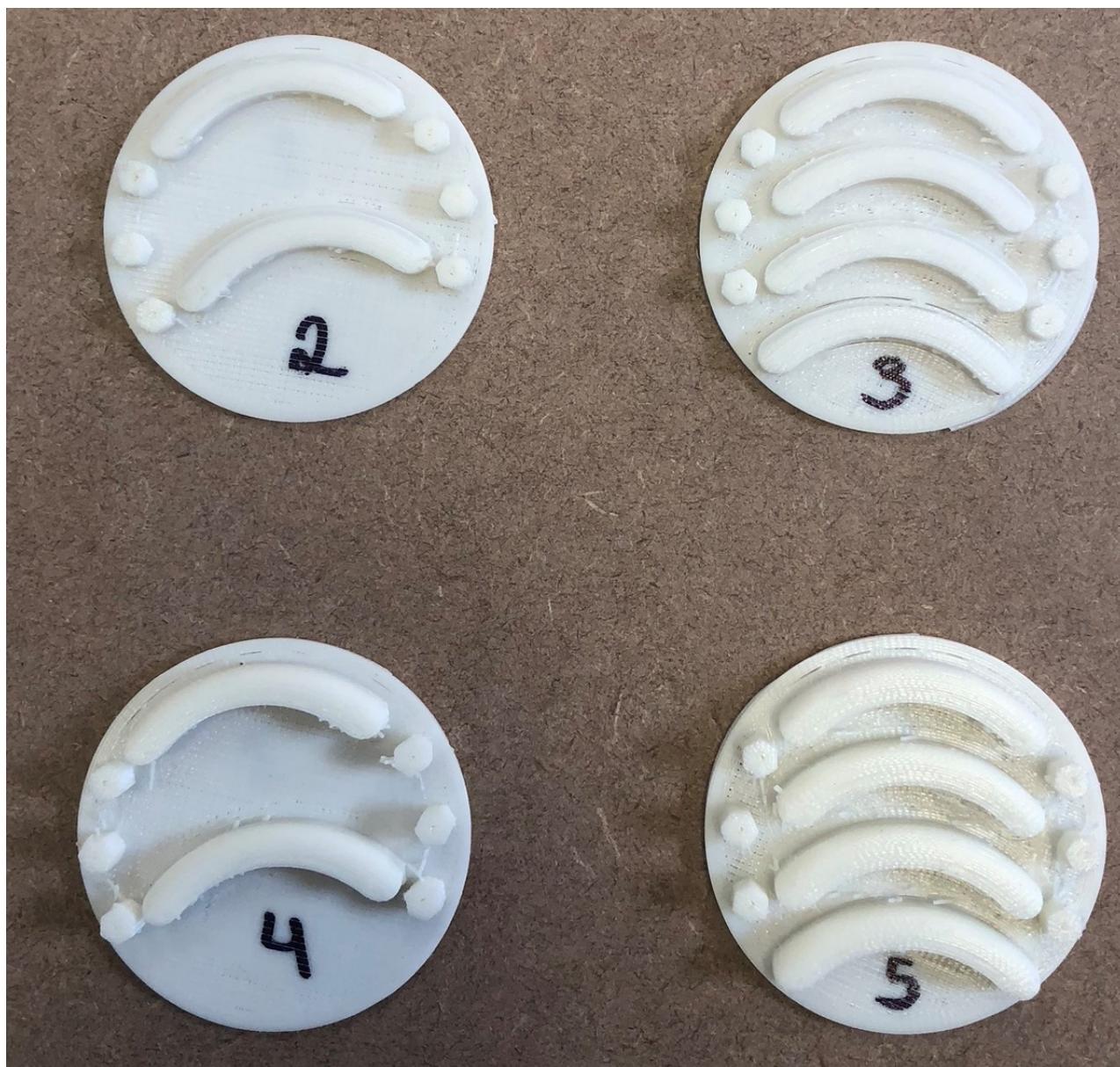


Figura 50: As quatro placas da série Alpha utilizadas em testes.

-	Ângulo Máx	Ângulo Mín	Diferença volumétrica
Cerdas Máx	A5 - 4239	A3 - 2844	33%
Cerdas Mín	A4 - 3320	A2 - 2535	23%
Diferença volumétrica	22%	11%	-

Tabela 13: Comparação de volume entre as quatro placas Alpha1 impressas para testes

O principal fator responsável pela diferença volumétrica entre as placas é antes o ângulo dos microdermatoglitos - o que afeta a altura e espessura total das cerdas, conforme Figura 51, um elemento que não poderia ser mudado sem prejudicar os testes do ponto de vista das características geométricas do conjunto de escamas. Contudo, como todas as placas possuem cerca de 5 vezes inferior que o do bloco de madeira usado nos testes com a série A0, resolveu-se por o usar novamente, de forma que as diferenças de peso pudessem ser consideradas irrelevantes para comparação de resultados.

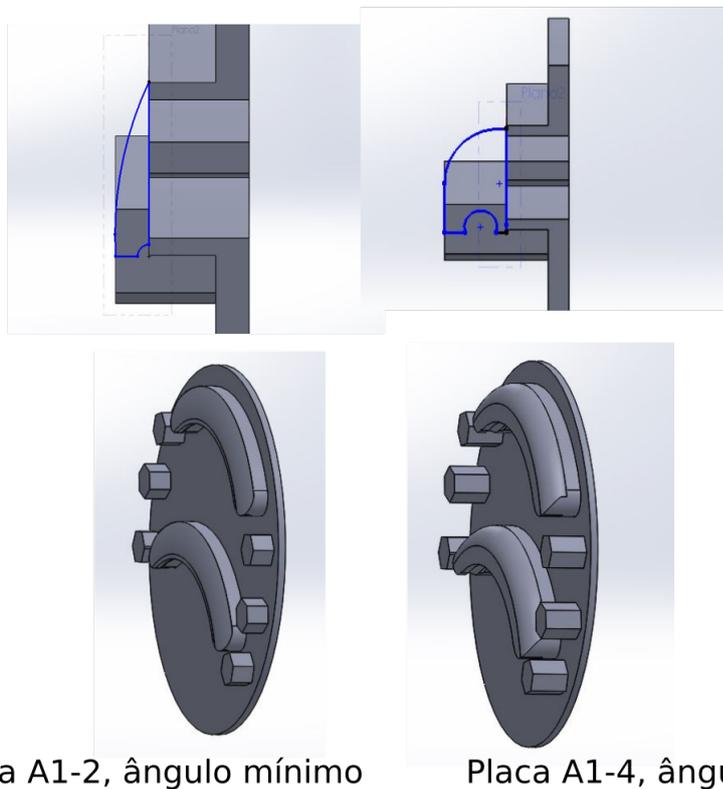


Figura 51: Diferença nas dimensões das cerdas em acordo com ângulo de acabamento superficial (microdermatoglitos).

As placas da série A1 foram submetidas em testes de plano inclinado, da mesma maneira que a placa A0-1 na comparação entre suas superfícies lisa e com escamas, com as seguintes especificidades:

- São usados dois pontos de tomada de tempo, P1 e P2;

Grandeza para inclinação de 45 °	A2	A3	A4	A5
Diferença entre positivo e negativo 1	-3,96%	2,97%	7,55%	7,88%
Desvio padrão sentido Positivo	0,02	0,04	0,05	0,04
Desvio padrão sentido Negativo	0,03	0,03	0,04	0,03
Diferença entre positivo e negativo 2	13,84%	5,89%	19,45%	18,23%
Desvio padrão sentido Positivo	0,02	0,03	0,04	0,13
Desvio padrão sentido Negativo	0,02	0,03	0,03	0,07
Grandeza para inclinação de 60 °	A2	A3	A4	A5
Diferença entre positivo e negativo 1	13,22%	5,07%	9,24%	9,52%
Desvio padrão sentido Positivo	0,05	0,02	0,03	0,03
Desvio padrão sentido Negativo	0,06	0,08	0,06	0,05
Diferença entre positivo e Negativo 2	21,00%	10,83%	7,21%	17,46%
Desvio padrão sentido Positivo	0,03	0,02	0,03	0,02
Desvio padrão sentido Negativo	0,03	0,03	0,04	0,04

Tabela 14: Análise de anisotropia em dois sentidos para dois ângulos de inclinação usando série A1

- O primeiro ponto, P1, está há uma distância de 300 mm do ponto inicial P0, e a tomada de tempo se dá quando a primeira parte do bloco de madeira o atinge;
- O segundo ponto, P2, está há uma distância de 50 mm do ponto P1. A tomada de tempo se dá quanto o bloco termina de passar pelo pela marcação.

A escolha dos pontos de tomada de tempo foi em parte limitada pelas dimensões do plano inclinado, mas estes foram planejadas com base nos testes anteriores a fim de diminuir influência de rotações (enquanto localizados em distâncias nas quais as placas costumam alcançar desvios máximos) e de mudanças de velocidade geradas pelo atrito (estando ambos à distâncias do ponto inicial no qual os conjuntos tenham atingido escorregamento bruto).

A determinação de dois pontos de tomada de tempo teve caráter investigativo, enquanto desejando avaliar a influência do atrito em dois deslocamento de grandezas diferentes, posto que a distância total percorrida e a dimensão desta em relação à área total de contato são elementos considerados na literatura sobretudo do ponto de vista de modelagem, conforme concluído pelos Capítulos 4 e 5. Os resultados das medições são apresentados na Tabela 14.

O objetivo dos testes com a série A1 foi identificar quais dos três aspectos selecionados tiveram maior influência no atrito observado e sobretudo quais trouxeram maiores níveis de anisotropia. Como as diferenças entre os sentidos Positivo e Lateral tiveram desvios padrões superiores à 1,0 em 2 dos 4 casos (A1-2 e A1-4), esta análise não é apresentada na tabela. O principal motivo para tal resultado, tendo em vista as filmagens, foi a rotação excessiva durante escorregamento das placas, comportamento que pode estar relacionado ao fato de que ambas possuem níveis mínimo de cerdas.

Um resultado que se destaca na Tabela 14 são os altos valores de diferença entre

Placas/Velocidade (m/s)	A2	A3	A4	A5
Velocidade Primeiro ponto Positivo	0,903	0,946	0,933	0,967
Velocidade Segundo ponto Positivo	0,636	0,588	0,483	0,449
Diferença Percentual	29,54	37,81	48,27	53,63
Velocidade Primeiro ponto Negativo	0,937	0,900	0,868	0,897
Velocidade Segundo ponto Negativo	0,739	0,555	0,631	0,549
Diferença Percentual	21,21	38,21	27,32	38,21

Tabela 15: Comparação entre velocidades médias no plano inclinado da série A1

sentido Positivo e Negativo na placa A1-2, visivelmente superiores em comparação com os demais. Entretanto, como esse mesmo comportamento não se reproduz na placa A1-3, as filmagens foram reavaliadas em busca de uma justificativa. Concluiu-se que a maior parte do arito observado advém não da placa A1-2, mas do bloco de madeira, o qual apresentou vários momentos de contato. Por causa deste problema, os resultados desta placa são desconsiderados.

O segundo elemento a ser considerado são as diferenças observadas em relação aos dois pontos de tomada de tempo. As diferenças no segundo ponto foram maiores do que as do primeiro em todos os casos para os dois ângulos, diferença esta que também pode ser observada ao se comparar as velocidades médias de escorregamento das placas com base nos pontos, como mostrado na Tabela 15.

Contudo, resta a questão do quão confiáveis são os dados referentes ao segundo ponto. Para tal análise foi aplicada uma variação do método de comparação entre efeito e desvio padrão, (BOX; HUNTER; HUNTER, 2005), de forma que se uma placa tiver resultado principal (tempo de escorregamento) tal que $EP_i > 3.DP_i$, pode-se supor que os resultados obtidos sejam antes derivados dos aspectos considerados do que de ruídos ou erros experimentais. Com isso, pode-se assumir com razoável segurança de que os dados obtidos no segundo ponto de tomada de tempo são válidos, restando discutir o que justifica suas diferenças frente aos do primeiro.

A primeira questão é que mesmo considerando as velocidades apresentadas na Tabela 15 como médias, a velocidade real de deslocamento em função do tempo realizada pelos conjuntos bloco/placa não o é, sofrendo aceleração da gravidade desde o momento em que o conjunto é solto até sua parada completa ou até que atinja seu ponto de máximo.

Coluna/ Linha	A1-2 P	A1-3 P	A1-4 P	A1-5 P	A1-2 N	A1-3 N	A1-4 N	A1-5 N
A2	1	-4,73	-3,33	-7,14	1	4,09	7,43	4,32
A3	4,51	1	1,33	-2,30	-4,26	1	3,49	0,24
A4	3,22	-1,35	1	-3,69	-8,03	-3,62	1	-3,37
A5	6,66	2,25	3,55	1	-4,51	-0,24	3,26	1

Tabela 16: Comparação percentual entre velocidade obtidas placa à placa

Com isso, o fato da segunda velocidade ser menor em todos os pontos é uma consequência física antes de matemática ou um erro do modelo.

Ainda que as velocidades sejam diferentes entre os dois pontos, elas mantêm a mesma tendência de razão de valores entre placas e sentidos de escorregamento que os outros testes realizados, permitindo assim uma avaliação dos aspectos e níveis das geometrias aplicadas nas placas a fim de reproduzir condições de anisotropia.

9.5 Conclusões da Série Alpha e Desenho Série Beta

A motivação da manufatura e dos testes realizados com a série de placas Alpha, incluindo A0 e A1, foi a obtenção de dados quanto à reprodução de anisotropia de maneira artificial e controlada, fazendo uso ressaltos geométricos inspirados em cobras e que tenham sido discutidos na literatura referente à movimentação cobra.

O objetivo não foi determinar uma geometria ideal ou um tipo de acabamento ideal para garantir a melhor anisotropia, mas antes avaliar o quão possível seria o controle desta, o quanto as placas seriam capazes de se aproximar de um caso real e quais aspectos tem - a princípio- maior influência perceptível em testes relacionados à grandezas de interesse no desenvolvimento da rotina de calibração, como velocidade em função do tempo e estabilidade durante escorregamento. Comparações cruzadas entre as placas são apresentadas na Tabela 16.

Os dados em destaque são os aqui de maior interesse, pois indicam quando uma placa em um dado sentido apresentou maior atrito em relação às demais indicadas na primeira coluna. No caso, valores negativos indicam que a placa indicada na linha teve desempenho melhor quanto ao atrito que a placa indicada na coluna, no mesmo sentido de escorregamento.

Foram desconsiderados os dados advindos da placa A1-2 enquanto já concluído que eles não são confiáveis, mas os mesmos foram mantidos na tabela para servirem de comparação em relação aos demais. Em verdade, eles serviram para indicar - conforme coluna A2-N - que o bloco em si apresentaria um atrito menor que as placas no sentido positivo, porém maior no negativo. Isso se explica, novamente, pelo mal posicionamento entre a placa e o bloco, que gerou uma angulação indesejada na superfície, tornando a

parte positiva mais alta que a negativa.

Em despeito à A1-2, a placa A1-4 teve melhor desempenho tanto no sentido positivo quanto negativo, seguida pela A1-3.

Os resultados obtidos ao fim das análises deste capítulo podem ser resumidos como se segue:

- Para o conjunto de materiais utilizado com suas geometrias de camada específicas - determinadas durante prototipagem rápida - a densidade das placas é irrelevante na reprodução da anisotropia. Tal fato pode ser explicado devido à escala dos testes, onde todos foram realizados com placas individuais e não organizadas sequencialmente em estilo ACM, ou pelas propriedades mecânicas do PLA em si. Não foram obtidas conclusões quanto ao uso de dois materiais com propriedades mais diversas (conjunto pele-escamas sugerido por (FILIPPOV; GORB, 2013)), mas sendo toda a estrutura feita em um mesmo material rígido, densidade e deflexão tornam-se irrelevantes;
- Os dois níveis (mínimo e máximo) referentes ao número de cerdas nas placas tiveram efeito maior no sentido positivo que negativo, ao se comparar as placas A1-4 e A1-3 (mínimo) em relação à A1-5 (máximo). E o número de cerdas mínimo teve os melhores resultados (comparando A1-5 e A1-4);
- Não foram feitos testes com o objetivo de avaliar se o que trouxe o resultado de maior atrito na placa A4 em relação à A1-5 foi o número de cerdas ou o espaçamento entre estas;
- O ângulo dos microdermatoglitos teve maior efeito no sentido negativo do que no positivo, ao se comparar as placas A1-3 (mínimo) e A1-4 (máximo). Além disso, ao se considerar que as diferenças quando comparadas entre sentido nas placas A1-4 e A1-5 (mesmo ângulo) não foram tão notáveis, pode-se concluir que os microdermatoglitos tem maior importância na anisotropia do que o número de cerdas;
- Não foram feitas comparações quanto ao formato da base (aqui, semi-círculo), sendo este um resultado retirado de um trabalho anterior, (JAYME, 2016), contudo, os ensaios com a série A0, mostrou que em que o formato aqui usado já traz algum nível de anisotropia entre os três sentidos, mesmo sem a adição de acabamento. Nesse sentido, tendo em vista os resultados da placa A0-1, os sentidos L e N tiveram comportamentos parecidos ou alternados quanto ao atrito em vários ensaios. Ainda que na maioria N tenha sido maior que L, o uso de estruturas de disposição linear no sentido N pode ser um aspecto interessante;
- Pode-se perceber que, quanto maior a inclinação do plano e maior a velocidade de escorregamento, maior é a diferença de atrito entre os sentidos positivo e negativo. Provavelmente, em acordo com Stribeck, como visto na Seção 5.4, há um ponto de

velocidade no qual essa diferença se torna irrelevante. Porém, para as velocidades de operação esperadas do robô, esse é um fator a ser considerado em desenvolvimentos futuros.

As conclusões observadas foram aplicadas no desenvolvimento conceitual da série Beta, conforme Figura 52. No caso, tem-se uma placa com um número intermediário de cerdas e com espaçamento maior que nas predecessoras. Além disso, o formato dos microdermatoglitos é diferente, de forma a ter um ângulo mais acentuado. O número de ressaltos laterais aumentou conforme o tamanho destes diminuiu. E por fim, devido ao resultado observado nos testes em plano inclinado com o conjunto bloco-placa A1-2, sugere-se um desnível entre os sentidos P e N de escorregamento para incrementar a anisotropia entre estes.

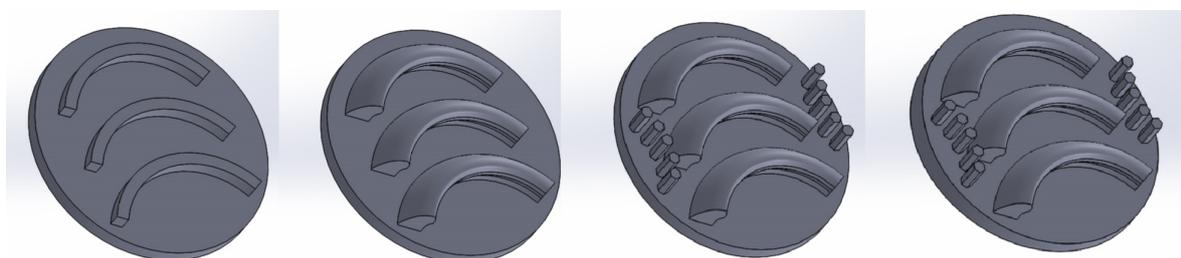


Figura 52: Design conceitual da série Beta, com base em resultados obtidos com série Alpha.

10 Simulação Numérica da Rotina de Calibragem

Como dito em (OLSSON, 1996), quando se pensa em controle de sistemas nos quais o atrito seja relevante, deve-se pensar em três etapas: modelagem, análise e compensação. Ou seja, a modelagem do sistema de interesse (protótipos VDM, conforme Capítulo 8), a análise de como esse interage com o ambiente (que é feita usando os sensores, conforme capítulo 6) e, se necessário, como compensar os efeitos observados causados pelo atrito, conforme capítulo 4, fazendo uso dos parâmetros obtidos durante a rotina de calibragem discutida no capítulo 7.

Considerando três modelos de atrito (Dahl, Cerdas e LuGre), os parâmetros gerais de entrada dos modelos incluem:

- Força de Coulomb F_C ;
- Velocidade de deslocamento relativo;
- Equação que descreva o deslocamento $x(t)$;
- Conjunto de características σ para Dahl e LuGre.

10.1 Obtenção da Força de Coulomb

Seja r_n a distância do atuador até o centro de massa do Bloco Atuado Bn. O torque do atuador que realiza o ângulo α de calibragem deve ser tal que $\tau_{teórico} = F \cdot r_n \cdot \sin\beta$, onde F corresponde ao peso do Bloco, de forma que o torque tem que ser tal que seja capaz de mover o bloco. Partindo da ideia de que o torque deve ser mantido constante e igual ao torque teórico, mas que o ângulo executado trata-se de uma variável sujeita as condições do terreno, tem-se que existem dois ângulos, β_{real} e $\beta_{teórico}$, correspondentes ao experimento e à teoria.

Como a força de atrito tem caráter não linear, será aqui usada uma simplificação da definição de torque tal que a força observada no sistema seja $F_{real} = \frac{\tau_{teórico}}{l_{bloco} \cdot \sin(\alpha_{real})}$, sendo então uma razão entre o ângulo real executado e o torque aplicado pelo servo.

Sabendo que a força $F_{teórica}$ é determinada pelo peso do Bloco, que aqui será considerado como medido em plano reto com aceleração da gravidade em acordo com o local de uso, é possível se observar a diferença entre ambas as forças. Essa diferença será atribuída à força de atrito de Coulomb tal que $F_C = F_{real} - F_{teórico}$.

Esse método faz uso de várias aproximações físicas e matemáticas, o que tira parte de sua precisão, como ao usar o seno do ângulo de atuação em lugar da realização do produto vetorial entre o deslocamento e a força, porém são considerações aqui suficientes enquanto o objetivo do trabalho é a apresentação da rotina de calibragem quanto à sua lógica de funcionamento e resultados esperados e não o estudo aprofundado da não-linearidade do atrito.

É possível relacionar o ângulo de atuação e a distância entre dois pontos pré-determinados do robô é dada por $sen\alpha = \frac{D^2 - l_{bloco}^2 - l_{ancora}^2}{2 \cdot l_{ancora} \cdot l_{bloco}}$, sendo D a distância entre os pontos, a qual não deve ser confundida com db , o qual se refere ao deslocamento total realizado pelo ponto de interesse (como centro de massa do bloco atuado), de forma que $db = l_{bloco} \cdot \alpha$. Para que o processo funcione, é importante que os dois pontos de referência sejam posicionados de forma que um esteja no bloco atuado e outro na parte de âncora. Além disso, a posição destes dois pontos deve ser clara em relação ao atuador que gere o deslocamento do bloco para a determinação dos comprimentos l_{bloco} e l_{ancora} . A Figura 53 descreve o procedimento.

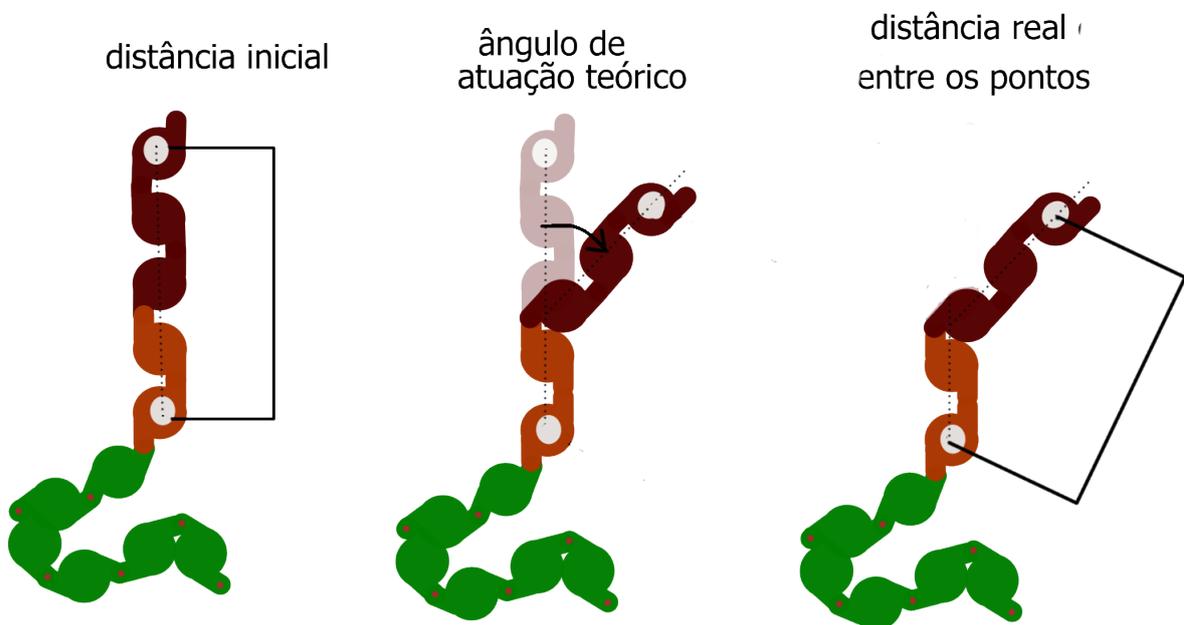


Figura 53: Os três passos da rotina de calibragem: determinação da distância inicial, do ângulo de atuação teórico e da distância real entre os pontos de referência.

Como o atrito teórico é obtido em função da distância real, esse resultado envolve tanto as características do terreno quanto o atrito intrínseco ao robô, podendo ser utilizado para um sistema de controle de tendência híbrido, conforme discutido no Capítulo 6. Contudo, enquanto dependente do uso de sensores - e consequentemente da precisão

α teórico = 45					
Distância real	564,33	574,33	584,33	594,33	600
Ângulo α real	39,71	33,64	26,25	15,77	0
Força de Atrito	0,002	0,05	0,01	0,27	0
α teórico = 60					
Distância Real	539,61	559,61	579,51	599,61	600
Ângulo α real	51,85	42,28	29,95	4,10	0
Força de Atrito	0,001	0,004	0,01	0,15	0

Tabela 17: Relação numérica entre ângulo teórico de calibragem, distância real medida e atrito

destes, se faz necessário observar a relação entre ângulo, distância e força de atrito obtida pelo método. Para isso, foram realizados testes numéricos em *software* Matlab, onde se determinou inicialmente um ângulo α qualquer de entrada, a distância entre os pontos de referência e a junta e a massa dos módulos. Com essas informações, obteve-se uma distância D teórica. Essa distância foi alterada manualmente, a fim de se obter uma distância D "real", com base na qual determinou-se o α "real" e a força de atrito resultante. Os resultados desta simulação são apresentados na Tabela 17.

Como se pode observar, diferenças de 10 mm nas distâncias foram capazes de alterar a ordem de grandeza do atrito de interesse. Um ponto a ser corrigido na rotina é a adição de que, quando a distância real for igual à distância teórica inicial entre os pontos de referência, ou seja, $\alpha = 0$, pode existir alguma condição no terreno que esteja impedindo deslocamento do bloco atuado em relação ao de âncora, como um obstáculo na superfície ou algum elemento no qual o robô tenha se enroscado. Contudo, para fins da análise de possibilidade de aplicação desta rotina, os resultados aqui apresentados são suficientes.

Em tese, o simples uso da força de atrito estática obtida ao fim dessa primeira etapa de calibragem poderia ser utilizada para fins de compensação, entretanto a obtenção desta ignora fatores como velocidade, características mecânicas entre outras informação consideradas em modelos de atrito dinâmicos, conforme previamente discutido no Capítulo 4, o que pode gerar situações de compensação extra ou conclusões incompletas quanto ao estado do terreno onde o robô se encontre.

10.2 Velocidade, Deslocamento e Parâmetros Iniciais

Todos os três modelos de atrito dinâmico apresentados no Capítulo 5 tem como dado de entrada a velocidade observada durante o deslocamento. Em todos os modelos, serão usadas as velocidades obtidas para a placa A1-4 durante escorregamento em plano inclinado, conforme resultados apresentados ao longo da Seção 9.4.4.

Contudo, essa velocidade obtida é uma aproximação da velocidade real desempenhada pela placa, obtida pela relação entre a distância total percorrida no plano inclinado e o tempo decorrido entre os pontos iniciais e os pontos de tomada de tempo, sendo portanto uma velocidade constante. Como visto no Capítulo 5, isso não é um problema para os modelos de Dahl e Cerdas, contanto que sejam respeitados os requisitos de deslocamento (periódico). Já para LuGre, essa velocidade será usada como dado de entrada, porém a velocidade de saída não será constante.

O deslocamento será adaptado. Ao invés de se considerar o deslocamento real observado no plano inclinado, será utilizado um deslocamento teórico baseado no α "real" determinado pela rotina de calibragem. Dahl o corrige de forma automática para um deslocamento de comportamento periódico no tempo, enquanto Cerdas e LuGre consideram o ponto final α como o fim da iteração e ponto de atrito máximo, enquanto sendo o ponto onde se dá a transição entre escorregamento para adesão. Nenhum dos dois considera o ponto inicial $\alpha = 0$ como ponto de maior atrito por razões diferentes.

Cerdas não o faz porque, pela maneira como aqui foi modelado, o atrito máximo acaba sendo o atrito constante obtido após o ponto de ruptura, não necessariamente relativo ao de escorregamento. Já quanto à LuGre, se o ponto inicial fosse considerado como adesão, isso implicaria na necessidade de se adicionar elementos de pré-escorregamento na simulação, o que foge do escopo deste trabalho, o qual se propõe antes a validar o uso da rotina em conjunto com os modelos do que obter um sistema completo com todas as condições intermediárias observadas no Capítulo 4.

Quanto aos parâmetros iniciais, como nível de deflexão de cerdas e os coeficientes de amortecimento de LuGre, a lógica de Haessig, (HAESSIG; FRIEDLAND, 1990), de selecionar parâmetros suficientes para que se obtenha um dado resultado foi amplamente empregada em conjunto com as considerações de cada modelo. Por exemplo, no caso de Cerdas, a constante de resistência das cerdas K_b foi dada como uma relação entre a força de Coulomb obtida pela primeira parte da rotina e a velocidade relativa teórica advinda de A1-4.

No caso de LuGre, a rotina foi dividida em três etapas: primeiro, considera-se uma deflexão z tal que z seja equivalente à precisão dos sensores. Com esse valor, determina-se um σ_0 inicial tal que a força de atrito resultante seja igual à da primeira parte da rotina, enquanto σ_2 é determinado usando a velocidade de A1-4. As duas constantes são suficientes para se iniciar o módulo, que retorna uma nova deflexão e uma nova velocidade, as quais são usadas para determinar um novo par de constantes, as quais são usadas como entrada para uma segunda iteração do modelo, após a qual tem-se as três constantes, σ_0 , σ_2 e σ_1 , com quais se obtêm a força de atrito do modelo e a velocidade relativa derivada deste.

Em resumo, todos os três modelos são completamente passíveis de execução usando os dados advindos do robô e da primeira etapa da rotina de calibragem (determinação de

atrito de Coulomb), sem que sejam desrespeitados seus requisitos e limitações.

10.3 Comparação de Resultados Entre Dahl, Cerdas e LuGre

Os três modelos de atrito selecionados foram aplicados à rotina de calibragem, a qual forneceu três forças de atrito iniciais cujos valores foram: 0.0012 N, 0.0014 N e 0.0100 N. Estes foram inseridos nos modelos enquanto parâmetros de entrada, denominados como Força de Coulomb ou Força Experimental.

Na Figura 54, tem-se os resultados para o modelo de Dahl. Nos três casos, os pontos de pico positivo estiveram próximos do valor inicial de F_c , contudo, no terceiro caso, pode-se perceber um distúrbio a partir de $t = 30$ s. Não foi identificada a causa deste, ou o porquê dele não se manifestar nos outros dois casos.

Na Figura 55, tem-se o modelo de cerdas, o qual teve resultados finais ainda mais próximos de F_c que Dahl, o que era esperado devido à sua natureza. Ambos os modelos atingem o pico de atrito antes de $t = 5$, o que está em acordo com o esperado, tendo em vista a velocidade relativa inicial e o deslocamento total em arco realizado pelo bloco atuado.

Na Figura 56, contudo, a relação entre força de atrito máxima e tempo percorrido não foi coerente, em parte pelo fato de que a velocidade de saída do modelo foi quase 20 vezes menor do que a velocidade relativa de entrada e em parte porque a força de atrito inicia-se em pontos negativos ao invés de 0, uma consequência da presença de fatores viscosos no modelo. Ainda assim, os valores de pico da curva seguiram o comportamento dos demais modelos, enquanto aumentando com maior força de atrito de entrada. Porém a força de saída de LuGre não se alterou na mesma proporção que Dahl e Cerdas, novamente em consequência de fatores viscosos. Contudo, um resultado interessante de LuGre foi o comportamento de deflexão de cerdas, a qual diminui conforme se aumentou o atrito, o que faz sentido enquanto se pensa que um maior atrito resulta em uma menor distância percorrida e consequentemente numa taxa menor de deformação das cerdas.

Comparando-se os resultados dos três modelos, pode-se perceber que o modelo de LuGre teve os piores resultados quanto à velocidade de saída e comportamento no tempo, porém é o que naturalmente fornece mais informações automaticamente sobre o sistema. Dahl teve um desempenho melhor porém, ainda que sendo um sistema dinâmico, as adaptações de deslocamento necessárias geram alteração de informações, como pode ser visto na forma constante da curva de atrito no tempo, o tornando menos atraente para a forma como a rotina de calibragem foi idealizada. Quanto ao modelo de cerdas, seus resultados foram tão próximos de F_C que se torna questionável a necessidade de usar o modelo.

Com isso, tem-se que o modelo de LuGre seria o melhor a ser empregado na rotina

de calibragem, porém a rotina em si e a reprodução do modelo deve se refinada para que seus dados de saída sejam mais precisos.

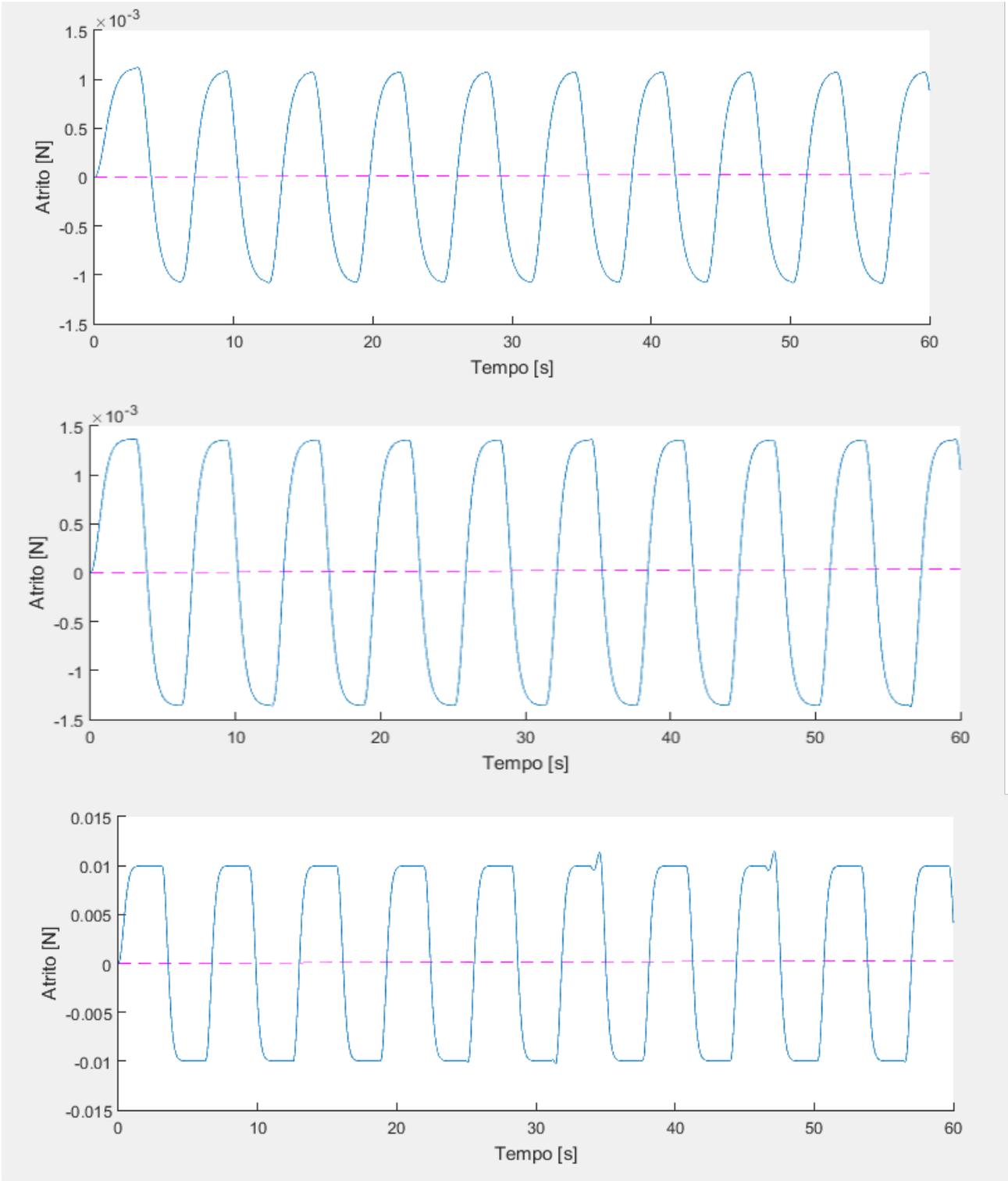


Figura 54: Resultados Numéricos Dahl

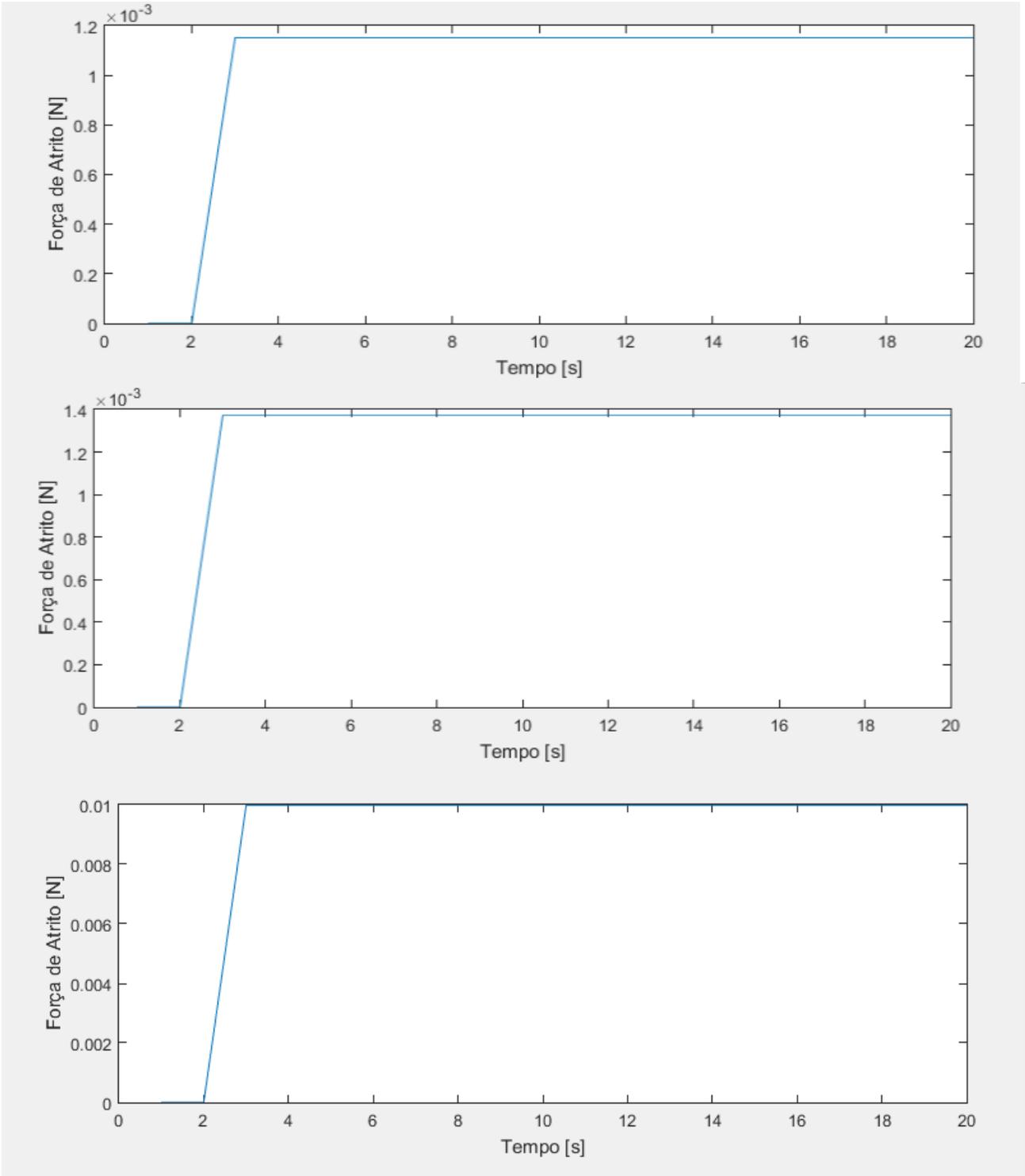


Figura 55: Resultados Numéricos Cerdas

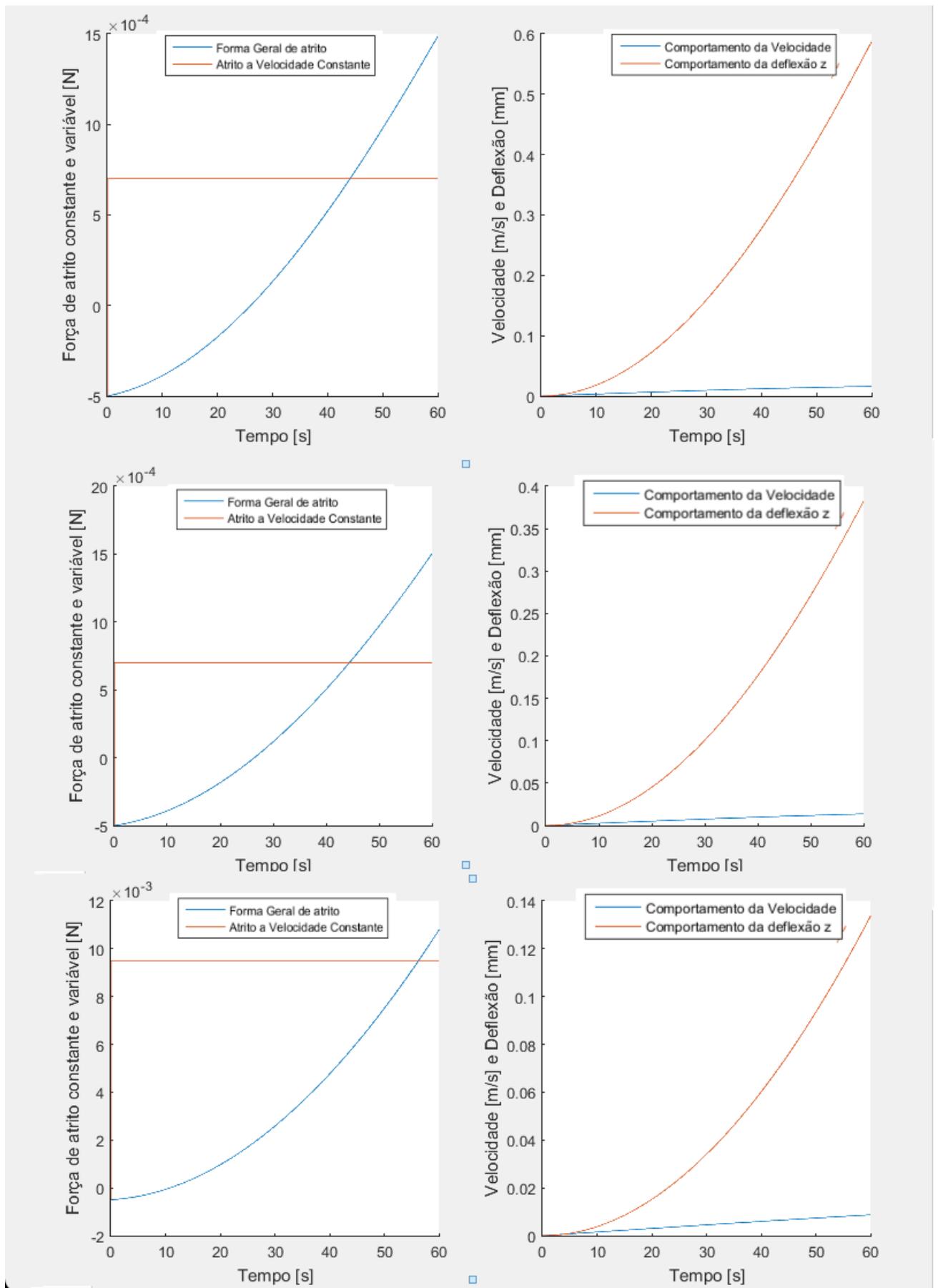


Figura 56: Resultados Numéricos LuGre

11 Conclusões

Seja a biomimética o estudo da natureza a fim de se obter soluções para problemas em sistemas humanos, pode-se então afirmar que este é um trabalho de biomimética com três focos principais: atrito, cobras e a relação entre estes.

O atrito é uma questão constante em qualquer sistema dinâmico onde se tenha pelo menos um ponto de contato entre suas superfícies com velocidade relativa diferente de zero, ainda assim, trata-se de um fenômeno muitas vezes simplificado na literatura tal que perde-se informações sobre este que poderiam ser usadas nos modelos, não apenas para fins de compensação de atuação ou para precisão de deslocamentos, mas para a obtenção de informações quanto à um terreno específico.

Animais fazem essa análise entre movimentação e condições da superfície de maneira automática e em geral instintiva, seus corpos já foram projetados tal que as respostas sejam processadas e se tornem dados de entrada para que corrijam suas passadas ou posicionamento de membros, como as cobras, que possuem até quatro estilos de locomoção diferentes documentados e comprovados, alternando-se entre estes em acordo com o contexto no qual se encontre. Essa adaptação evolutiva vai além de estímulo-resposta, ela pode ser percebida na anatomia dos animais, sobretudo nas cobras com suas escamas e curvas de distribuição de peso. Mas essas mesmas características não costumam ser observadas em robôs cobra ou, quando são, acabam sendo implementadas e analisadas de maneira individual, desconsiderando suas correlações.

Por isso, neste trabalho, buscou-se abordar todos os aspectos observados do ponto de vista biomimético e matemático dentro de uma única rotina de calibragem, a qual permita que o robô realize compensação de atrito para melhorar a precisão de sua movimentação mas também obter informações quanto às condições do terreno no qual se encontre. Essa rotina foi pensada a fim de poder ser executada independente das características superficiais do robô, fazendo uso das definições de atrito e de modelos dinâmicos para diminuir a necessidade de determinação de coeficientes específicos ou ambientes de medição controlados.

O robô se torna capaz de interpretar o ambiente usando apenas seus sensores e o conhecimento sobre sua própria morfologia, em maneira mais próxima de uma cobra de verdade. Além disso, a rotina independe do uso de superfícies de contato iso ou anisotrópicas, podendo ser utilizada em um robô que possua escamas artificiais, elemento

essencial na movimentação cobra e, como aqui mostrado, que pode ser construído usando simples relações geométricas.

O ponto mais importante é que tanto a rotina quanto a implementação de escamas podem ser feitas em qualquer robô seccionado ou modular com movimentação cobra, não sendo limitadas ao VDM. O objetivo não foi desenvolver um robô exclusivo e único, mas sim analisar quais pontos já presentes na literatura de robôs cobra poderiam ser explorados para que estes possam ser empregados em casos reais, como situações de desabamento em grandes cidades e busca e salvamento em destroços, da melhor forma possível para se obter o máximo de vantagens que robôs cobra trazem nestas situações já por definição.

Com isso, o principal resultado alcançado, tendo em vista os objetivos, foi a comprovação de que ainda há muito a ser aproveitado quanto à biologia das cobras dentro do contexto de robótica e atrito. É possível que um robô identifique características de seu terreno usando apenas relações trigonométricas e análise de posicionamento relativo de seu próprio corpo e também é possível inserir anisotropia em três direções de uma superfície de maneira artificial apenas por ressaltos com geometrias baseadas em escamas reais. E o fato de que tais conclusões dependeram de estudos tão mais basais, como centro de massa, funcionamento de controle de tendência e forma dos componentes (módulos e juntas) dentro de um robô servem ainda para mostrar o fato que foi a maior motivação deste trabalho: quando um problema surge, como a incapacidade de um robô cobra em se deslocar usando curvas de movimentação cobra as quais foi construído para seguir, muitas vezes é melhor voltar ao início e reavaliar todos os aspectos envolvidos do que criar novas soluções por cima do problema. Uma lição que seres humanos ainda tem dificuldades em aceitar, ainda que sejam nada menos que mais uma ramificação desta.

11.1 Trabalhos Futuros

A rotina de calibragem aqui proposta não foi validada através de sua aplicação em um robô completo, de forma que ainda faltam resultados nesta para se afirmar sua eficácia e o ganho real de seu uso em relação à perda de energia e tempo para sua execução. Deve-se salientar que, antes que tais testes sejam feitos, é preciso corrigir o modelo de LuGre utilizado na rotina para que seus resultados sejam condizentes com o tempo total do ciclo. Quanto à superfície anisotrópica artificial, faltam testes com a Série Beta para se determinar seu desempenho, sobretudo em comparação à série Alpha. Um teste importante seria a observação deste implementado em um robô com movimentação *pitch-yaw*, posto que os testes aqui realizados, ainda que comprovem a possibilidade de criar uma superfície anisotrópica em três sentidos, foram limitados ao escorregamento em um plano inclinado.

Referências

- AL-BENDER, F. Fundamentals of Friction Modelling. *ASPE Spring Top. Meet. Control Precis. Syst.*, p. 117–122, 2010. ISSN 0036-8733. Citado na página 29.
- AL-BENDER, F.; SWEVERS, J. Characterization of friction force dynamics. *IEEE Control Syst. Mag.*, v. 28, n. 6, p. 64–81, 2008. ISSN 08880611. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 43.
- BAR-COHEN, Y. *Biomimetics: biologically inspired technologies*. [S.l.]: CRC Press, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.
- BAUM, M. J.; HEEPE, L.; GORB, S. N. Friction behavior of a microstructured polymer surface inspired by snake skin. p. 83–97, 2014. Citado na página 85.
- BENHABIB, B.; DAI, M. Mechanical design of a modular robot for industrial applications. *J. Manuf. Syst.*, v. 10, n. 4, p. 297–306, jan 1991. ISSN 02786125. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/027861259190024V>>. Citado na página 11.
- BERTHÉ, R. A. et al. Surface structure and frictional properties of the skin of the Amazon tree boa *Corallus hortulanus* (Squamata, Boidae). *J. Comp. Physiol. A Neuroethol. Sensory, Neural, Behav. Physiol.*, v. 195, n. 3, p. 311–318, 2009. ISSN 03407594. Citado 3 vezes nas páginas 2, 34 e 85.
- BOEMO SCALVINONI Translator, E.; Walter Routley, T. MODULAR ROBOTICS AND LOCOMOTION: APPLICATION TO LIMBLESS ROBOTS. 2008. Citado na página 15.
- BORENSTEIN, J.; HANSEN, M.; BORRELL, A. The OmniTread OT-4 Serpentine Robot—Design and Performance. *J. F. Robot.*, v. 24, n. 7, p. 601–621, 2007. Citado na página 9.
- BOX, E. G.; HUNTER, J.; HUNTER, G. W. *Statistics for Experimenters: Design, innovation, and discovery*, 2nd edition. [S.l.]: Wiley, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 85, 89 e 100.
- Canudas de Wit, C. et al. A new model for control of systems with friction. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1995. ISSN 00189286. Citado 3 vezes nas páginas 50, 51 e 52.
- COSTA, N. et al. PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ MODULAR. v. 21, 2010. Citado na página 18.
- CURNIER, A. A theory of friction. *Int. J. Solids Struct.*, v. 20, n. 7, p. 637–647, 1984. ISSN 00207683. Citado na página 30.
- DAHL, P. R. *A solid friction model*. [S.l.], 1968. Citado na página 39.

- DANIEL, R. W. *Control of machines with friction. Brian Armstrong-Hélouvy*. [S.l.: s.n.], 1992. v. 28. 1285–1287 p. ISSN 00051098. ISBN 978-0-7923-9133-3. Citado 5 vezes nas páginas 50, 58, 59, 62 e 63.
- DERBY, C. D.; STEULLET, P. Why do animals have so many receptors? The role of multiple chemosensory in animal perception. *Biol. Bull.*, v. 200, n. April, p. 211–215, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 57.
- DOWLING, K. J.; WHITTAKER, W. L. Limbless Locomotion: Learning to Crawl with a Snake Robot. 1997. Citado 3 vezes nas páginas 2, 8 e 11.
- DRIN, B.; ENGINEERING, A. Mechanical Models of Friction That Exhibit Hysteresis , Stick-Slip , and the Stribeck Effect. 2012. Citado na página 50.
- DUPONT, P. E. Friction modeling in dynamic robot simulation. In: IEEE. *Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on*. [S.l.], 1990. p. 1370–1376. Citado na página 30.
- FILIPPOV, A.; GORB, S. N. Frictional-anisotropy-based systems in biology: structural diversity and numerical model. *Scientific reports*, Nature Publishing Group, v. 3, p. 1240, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 35, 86 e 102.
- FILIPPOV, A. E.; GORB, S. N. Modelling of the frictional behaviour of the snake skin covered by anisotropic surface nanostructures. *Sci. Rep.*, Nature Publishing Group, v. 6, n. August 2015, p. 1–6, 2016. ISSN 20452322. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/srep23539>>. Citado na página 85.
- FISH, F. E. et al. Marine applications of the biomimetic humpback whale flipper. *Marine Technology Society Journal*, Marine Technology Society, v. 45, n. 4, p. 198–207, 2011. Citado na página 8.
- FUKUDA, T. et al. Self Organizing Robots Based on Cell Structures-CEBOT. *IEEE Int. Work. Intell. Robot. 1988*, p. 145–150, 1988. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs/all.jsp?arnumber=592>>. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 15.
- GARCÍA-BAÑOS, I.; IKHOUANE, F. A new method for the identification of the parameters of the Dahl model. v. 744. Citado 3 vezes nas páginas 40, 41 e 46.
- GOMEZ, J. G. Modular Robotics And Locomotion: Application of limbless robots. *Ph.D. Thesis*, p. 1 – 436, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 2, 13, 22 e 24.
- GONZALEZ-GOMEZ, J. et al. Toward the sense of touch in snake modular robots for search and rescue operations. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 62.
- GRABEC, I. Control of a creeping snake-like robot. In: IEEE. *Advanced Motion Control, 2002. 7th International Workshop on*. [S.l.], 2002. p. 526–531. Citado na página 37.
- GUIMARÃES, P. P. et al. A bio-inspired apodal and modular robot. In: IEEE. *Robotics Symposium and IV Brazilian Robotics Symposium (LARS/SBR), 2016 XIII Latin American*. [S.l.], 2016. p. 61–66. Citado na página 18.
- HAESSIG, D.; FRIEDLAND, B. On the Modeling and Simulation of Friction. n. November 2015, 1990. Citado 10 vezes nas páginas 42, 43, 44, 45, 47, 48, 51, 86, 89 e 107.

- HATTON, R. L. et al. Snakes on a plan: Toward combining planning and control. In: *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* [S.l.: s.n.], 2013. ISBN 9781467356411. ISSN 10504729. Citado na página 2.
- HIROSE, S.; MORI, M. Biologically Inspired Snake-like Robots. Citado 3 vezes nas páginas 2, 13 e 37.
- HSU, S.; YING, C.; ZHAO, F. The nature of friction: A critical assessment. *Friction*, v. 2, n. 1, p. 1–26, 2014. ISSN 22237704. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- HU, D. L. et al. The mechanics of slithering locomotion. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, v. 106, n. 25, p. 10081–10085, 2009. ISSN 0027-8424. Citado 3 vezes nas páginas 2, 23 e 34.
- HUANG, P.; YANG, Q. Theory and contents of frictional mechanics. *Friction*, v. 2, n. 1, p. 27–39, 2014. ISSN 22237704. Citado na página 27.
- JARDIM, B.; SIQUEIRA, A. A. G. Development and analysis of series elastic actuators for impedance control of an active ankle-foot orthosis. *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2014. ISSN 1678-5878. Citado 2 vezes nas páginas 61 e 62.
- JAYME, R. F. Pg: Influência Do Atrito Na Locomoção De Robôs Apodais. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 86 e 102.
- KAMEGAWA, T. et al. Development of the Snake-like Rescue Robot KOHGA. *IEEE Int. Conf. Robot. Autom. 2004. Proceedings. ICRA . 2004*, v. 5, n. April, p. 5081–5086, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 2, 8, 14 e 15.
- KHAN, S. G. et al. Compliance Control and Human–Robot Interaction: Part 1 — Survey. *Int. J. Humanoid Robot.*, 2014. ISSN 0219-8436. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.
- KUROKAWA, H. et al. Self-reconfigurable modular robot (m-tran) and its motion design. In: IEEE. *Control, Automation, Robotics and Vision, 2002. ICARCV 2002. 7th International Conference on*. [S.l.], 2002. v. 1, p. 51–56. Citado na página 16.
- KUROKAWA, H. et al. Distributed self-reconfiguration of m-tran iii modular robotic system. *The International Journal of Robotics Research*, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 27, n. 3-4, p. 373–386, 2008. Citado na página 16.
- LEE, D. V.; BIEWENER, A. A. BigDog-inspired studies in the locomotion of goats and dogs. In: *Integr. Comp. Biol.* [S.l.: s.n.], 2011. ISBN 1540-7063. ISSN 15407063. Citado 4 vezes nas páginas 3, 8, 11 e 57.
- LIANG, J.; FILLMORE, S.; MA, O. An extended bristle friction force model with experimental validation. *Mech. Mach. Theory*, v. 56, p. 123–137, 2012. ISSN 0094114X. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 46.
- LILJEBACK, P. *Modelling, Development and Control of Snake Robots*. Tese (Doutorado), 2011. Citado 4 vezes nas páginas 2, 9, 22 e 24.
- LIU, B. X.; NIE, S. H. Dynamic Parameters Identification of LuGre Friction Model Based on Chain Code Technique. Citado na página 51.
- LIU, Y. F. et al. Experimental comparison of five friction models on the same test-bed of the micro stick-slip motion system. *Mech. Sci.*, 2015. ISSN 2191916X. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 53.

LOPES, K. R. F. Considerações sobre a importância do cão doméstico dentro da sociedade humana. *Acta Veterinaria Brasilica*, v. 6, n. 3, p. 177–185, 2012. Citado na página 8.

MA, O.; LIANG, J.; FILLMORE, S. A 2d bristle friction force model for contact dynamics simulation. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME 2009 Dynamic Systems and Control Conference*. [S.l.], 2009. p. 501–508. Citado na página 43.

MA, S. Analysis of Snake Movement Forms for Realization of Snake Like Robots. 1999. Citado 5 vezes nas páginas 2, 13, 22, 23 e 24.

MARCO, N.; TRINDADE, X. *Medição do atrito de escorregamento através da energia dissipada em sistemas vibratórios*. Tese (Doutorado) — Universidade de Coimbra, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 65 e 90.

MARTINS, L. T. et al. Design of a Modular Series Elastic Upgrade to a Robotics Actuator. Citado na página 61.

MARVI, H. et al. Snakes move their scales to increase friction. *Biotribology*, 2016. ISSN 23525738. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 35.

MELO, K. et al. The Modular Snake Robot Open Project: Turning animal functions into engineering tools. In: *2013 IEEE Int. Symp. Safety, Secur. Rescue Robot. SSR* 2013. [S.l.: s.n.], 2013. ISBN 9781479908806. ISSN 2374-3247. Citado na página 11.

MU, Z. et al. Two types of snake-like robots for complex environment exploration: Design, development, and experiment. *Adv. Mech. Eng.*, v. 9, n. 9, p. 1–15, 2017. ISSN 02721732. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

MURATA, S. et al. M-tran: Self-reconfigurable modular robotic system. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, IEEE, v. 7, n. 4, p. 431–441, 2002. Citado na página 16.

NANO, B.; JUN, S. Generating a Stribeck Curve in a Reciprocating Test. n. Figure 2, p. 1–8, 2016. Citado na página 50.

OLSSON, H. Control Systems with Friction. *Dep. Autom. Control. Lund Inst. Technol.*, v. 1045, n. October, p. 172, 1996. ISSN 0280-5316. Disponível em: <<https://lup.lub.lu.se/search/publication/17593>>. Citado 6 vezes nas páginas 2, 39, 50, 58, 90 e 104.

OLSSON, H. et al. Friction Models and Friction Compensation. *Eur. J. Control*, 1998. ISSN 09473580. Citado na página 49.

PETTERSEN, K. Y. *Snake robots*. 2017. Citado na página 2.

PIATKOWSKI, T. Dahl and LuGre dynamic friction models - The analysis of selected properties. *Mech. Mach. Theory*, 2014. ISSN 0094114X. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.

REINA, S. et al. Determining the coefficient of friction between solids without sliding. *Wear*, 2010. ISSN 00431648. Citado na página 32.

ROLLINSON, D. et al. Torque control strategies for snake robots. In: *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.* [S.l.: s.n.], 2014. ISBN 9781479969340. ISSN 21530866. Citado na página 61.

ROLLINSON, D.; CHOSET, H. Gait-based compliant control for snake robots. In: *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* [S.l.: s.n.], 2013. ISBN 9781467356411. ISSN 10504729. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 63.

ROLLINSON, D. et al. DESIGN AND MODELING OF A SERIES ELASTIC ELEMENT FOR SNAKE ROBOTS. Citado na página 61.

SANFILIPPO, F. et al. Perception-Driven Obstacle-Aided Locomotion for Snake Robots: The State of the Art, Challenges and Possibilities †. *Appl. Sci.*, 2017. ISSN 2076-3417. Citado na página 27.

SANFILIPPO, F. et al. Virtual functional segmentation of snake robots for perception-driven obstacle-aided locomotion? In: *2016 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, ROBIO 2016*. [S.l.: s.n.], 2016. ISBN 9781509043644. Citado na página 2.

SERRANO, M. M. et al. Incorporating frictional anisotropy in the design of a robotic snake through the exploitation of scales. *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, v. 2015-June, n. June, p. 3729–3734, 2015. ISSN 10504729. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 86.

SHINMI, A. V.; MAXIMIANO, R. C. *Obtenção de curvas de stribeck em sistema tipo mancal de deslizamento*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015. Citado na página 50.

SILVA, E. D. S.; BOCHNER, R.; GIMÉNEZ, A. R. M. O ensino das principais características das serpentes peçonhentas brasileiras: avaliação das literaturas didáticas no Ensino Fundamental do Município do Rio de Janeiro. *Educ. em Rev.*, n. 42, p. 297–316, 2011. ISSN 0104-4060. Citado na página 34.

SOUSA, A. C. C. de; VIANA, D. M. et al. Sensors in reconfigurable modular robot for pipeline inspection: Design and tests of a prototype. In: *IEEE. Robotics: SBR-LARS Robotics Symposium and Robocontrol (SBR LARS Robocontrol), 2014 Joint Conference on*. [S.l.], 2014. p. 7–12. Citado na página 18.

SOUZA, N. C. A. et al. Erekebot alfa project: Design and construction of a modular robot prototype. In: *21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering*. [S.l.: s.n.], 2011. v. 1. Citado na página 18.

SPROEWITZ, A. et al. Roombots—modular robots for adaptive furniture. In: *CITeseer. Workshop on Self-Reconfigurable Robots, Systems and Applications at IROS08, Nice, France, September*. [S.l.], 2008. v. 22, p. 59–63. Citado na página 16.

TABOR, D. Friction—the present state of our understanding. *Journal of lubrication technology*, American Society of Mechanical Engineers, v. 103, n. 2, p. 169–179, 1981. Citado na página 28.

TAPIA, F.; TOURNEAU, L.; GÉMINARD, J.-C. Anisotropic friction: assessment of force components and resulting trajectories. 2016. Citado na página 36.

TRANSETH, A. A. et al. 3-D Snake Robot Motion: Nonsmooth Modeling, Simulations, and Experiments. *IEEE Trans. Robot.*, v. 24, n. 2, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 37.

YAMADA, H.; HIROSE, S. Development of Practical 3-Dimensional Active Cord Mechanism ACM-R4. *J. Robot. Mechatronics Vol.18 No.3, 2006*, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.

YAMADA, H.; TAKAOKA, S.; HIROSE, S. A snake-like robot for real-world inspection applications (the design and control of a practical active cord mechanism). In: *Adv. Robot.* [S.l.: s.n.], 2013. ISSN 01691864. Citado 4 vezes nas páginas 3, 24, 37 e 77.

YIM, M.; DUFF, D. G.; ROUFAS, K. D. Polybot: a modular reconfigurable robot. In: IEEE. *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on.* [S.l.], 2000. v. 1, p. 514–520. Citado na página 16.

ZEILMANN, A. P.; GOMES, S. S.; SOARES, L. B. Teoria E Experimentação No Estudo Sobre Atritos Em. XXIX, p. 15–18, 2010. Citado na página 30.

ZHU, Y.; LYU, Y.; OLOFSSON, U. Mapping the friction between railway wheels and rails focusing on environmental conditions. *Wear*, 2015. ISSN 00431648. Citado na página 62.

Apêndices

A Curva de Movimentação Cobra

```

clc; clear all; close all;

N = 10; %número de módulos utilizados
l = 50; %comprimento total do módulo em mm

Kn = N/3; %número de oscilações

theta1 = pi/4;
theta2 = pi/6;
theta3 = pi/8;

alpha1 = [theta1,0,-theta1,theta1,0,-theta1,theta1,0,-
theta1,theta1,0,-theta1;];
alpha2 = [theta2,0,-theta2,theta2,0,-theta2,theta2,0,-
theta2,theta2,0,-theta2;];
alpha3 = [theta3,0,-theta3,theta3,0,-theta3,theta3,0,-
theta3,theta3,0,-theta3;];

i = 1;

while i<N
%alpha(i+1) = alpha(i)+((-1)^i)*60; %ângulo global

phi1(i) = alpha1(i)-alpha1(i+1); %ângulo de junta
s1(i) = abs(l*cos(alpha1(i)));

phi2(i) = alpha2(i)-alpha2(i+1); %ângulo de junta
s2(i) = abs(l*cos(alpha2(i)));

phi3(i) = alpha3(i)-alpha3(i+1); %ângulo de junta
s3(i) = abs(l*cos(alpha3(i)));

i = i+1;

end
S_11 = sum(s1); %tamanho do robô dentro da curva
k1 = (2*Kn*pi*alpha1/(N*1))*sin(Kn*pi*S_11/(N*1)); %fator de curva do
robô
theta_h1 = (1/N)*sum(alpha1(1:N));

S_12 = sum(s2); %tamanho do robô dentro da curva
k2 = (2*Kn*pi*alpha2/(N*1))*sin(Kn*pi*S_12/(N*1)); %fator de curva do
robô
theta_h2 = (1/N)*sum(alpha2(1:N));

S_13 = sum(s3); %tamanho do robô dentro da curva
k3 = (2*Kn*pi*alpha3/(N*1))*sin(Kn*pi*S_13/(N*1)); %fator de curva do
robô
theta_h3 = (1/N)*sum(alpha3(1:N));

```

B Modelo de Dahl

```

%%Modelo De Dahl-reprodução de resultados

clc
clear all
close all

dt = 1e-2; %%determina o espaço de tempo para colher dados
tf = 60; %%tempo total decorrido
t1 = [0:dt:tf];
Fc = 1; %%Força de Coulomb inicial
x1 = t1; %%Deslocamento. Esse tipo de deslocamento incorre em uma
    velocidade constante
ro1 = 1; %%Fator de histerese inicial

%%Primeira parte: identificação do Fc
y0 = [0];%%vetor de condição inicial para a ODE
[t1,w1] = ode45(@(t,w) dahl(t1,w,ro1),t1, y0);
F1 = Fc.*w1;

%%Segunda parte. Identificar ro.
% t2 = [0:30];
x2 = -cos(t1); %%deveria ser cos ou cos d??
xmax = max(x2); xmin = min(x2);
ro_up = 1-sqrt(1-(1-(((xmax+xmin)/2)*mean(F1))/Fc)^2));
ro_down = 1 - (mean(F1)*(xmax+xmin)/2)/Fc;
ro2 = (ro_up/ro_down)/abs(xmin-xmax);

[t2,w2] = ode45(@(t1,w) dahl2(t1,w,ro2),t1, y0);
F2 = Fc.*w2;

% t3 = t2(20:25);
% F3 = F2(20:25);
% x3 = x2(20:25);

hold on
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Atrito [N]')
plot(t1,F1,'m--')
plot(t2,F2,'r-.')
plot(t1, x2)

legend ('Primeira Iteração da Força de Atrito',...
        'Segunda Iteração da Força de Atrito',...
        'Deslocamento Periódico Determinado')
% pplot(t3,F3)
% lot(x3,F3)
hold off
N = length(t1);
df = 1/(t1(end)-dt);
freq = 0:df:df*(N-1);

F2w = 1/N*fft(F2); %%transformada rápida de Fourier

```

C Modelo de Cerdas

```

%%bristle model atualziado
%%Dados de entrada modelo

clc;clear all; close all;

x = 0; %Posição relativa entre as superfícies de contato
Vr = 0.002; %Velocidade relativa m/s

%%dados de entrada exemplo

m = 0.1; k = 100; %%sistema massa-mola
sigma_s = 10^(-5);% [m] deflexão de ruptura das cerdas
K_b = 1250; %[N/m] característica das cerdas
delta_r = 0.3*10^(-5); %[m], raio de aparecimento de novas cerdas

%%Inicialização do loop
delta = 0;
Fr = 0; %Força de atrito inicial
b_i = 0; %posição inicial das cerdas

n = f(Vr); %número de cerdas com base na velocidade relativa

n = [20:1:25];%ou n<50
i = 1;%número de iterações
j = 1;
%%condição do loop

while i<20 %número de iterações é razão do número teórico de cerdas

    %%Elementos do loop

    delta(i+1) = 0+(0-delta_r)*rand(1);
    if abs(delta(i+1))>delta_r
        delta(i+1) = delta_r;
    elseif delta(i+1)<0
        delta(i+1) = delta_r/2; %COMPLETAMENTE ARBITRÁRIO, SÓ PRA
        MEXER A PARADA
    end

    sigma_i(i+1) = Fr(i)/K_b; %deflexão das cerdas

    if abs(sigma_i(i))>delta(i+1) %condição de ruptura de contato entre
    as cerdas

        b_i(i+1) = b_i(i)+sign(sigma_i(i))*(delta(i+1))+Vr;
        Fr(i+1) = Fr(i);
        delta_r = 0.3*10^(-5)+3*(sigma_s-Fr(i)/K_b);
        x(i+1) = x(i)+Vr;
        a(i) = -1;
        b(i) = 0;
    else

```

D Modelo de LuGre

```

%%Modelo de LuGre reprodução de resultados

clc; clear all; close all;
tic
%%Dados de Canudas
sigma0 = 1670; %N/m
sigma1 = 6; %Ns/m
sigma2 = 26; %Ns/m
Fc = 2.5; %Força de atrito seco
Fs = 3; %Força advinda de Stribeck
vs = 1.6*10^(-8); %[N/s]
%%Os dados não fornecem Z nem V, que são os elementos dos quais eu
retiro
%%minha relação com o tempo e me permite plotar uma curva

dt = 1e-2; %%determina o espaço de tempo para colher dados
tf = 60; %%tempo total decorrido
t = [0:dt:tf];
z_e = 1;
k = 1;
e = 1;

%%fator de forma da curva de Stribeck
alpha = 2;
%%curva de stibeck em função da velocidade de deslizamento [N]
gv1 = (Fc+(Fs-Fc)*exp((0/vs)^alpha));
%%dz deve ser integrado. Isso vai me dar a relação no tempo
% dz = v-((sigma0*abs(v))/gv)*z

y0 = [0];%%vetor de condição inicial para a ODE

[t,z] = ode45(@(t,z) deflexao2(t,gv1,sigma0,z),t,y0);
[v,dz] = deflexao2(t,gv1,sigma0,z);
%[t2,w2] = ode45(@(t1,w) dahl2(t1,w,ro2), t1, y0);

toc

gv2 = (Fc+(Fs-Fc)*exp(-abs(v/vs).^alpha));
f_v = sigma2*v;
%%sigma0 deve ser tal que que o atrito máximo teórico seja igual
ao atrito máximo prático. Liu usa função fzero

%%força de atrito de Lugre para velocidade variável
FL = sigma0*z+sigma1*dz+f_v;
%%força de atrito de Lugre para velocidade constante
FLL = gv2.*sign(v)+f_v;

subplot(1,2,1)

```

E Cálculo Centro de Massa

```

clc; clear all; close all;

N = 10; %número de módulos utilizados
l = 50/2; %comprimento total do módulo em mm
m = 50;
phi = pi/3; %ângulo usado na calibragem
a = 7; %número de módulos na âncora

%%Caso 1: Cobra Esticada
x = l/2;
y = 0;
%cálculo das posições individuais

i = 1;
while i<N
x(i+1) = x(i)+l;
y(i+1) = y(i);

i = i+1;
end
x1l = x; y1l=y;
%%centro de massa gerall

X1_CM1 = m*sum(x)/(N*m);
Y1_CM1 = m*sum(y)/(N*m);

CM1l = [X1_CM1,Y1_CM1]

%%centro de massa das partes

n = N-a; %número de módulos no bloco atuado

j = 1;

while j<n+1
x(a+j) = x(a+j-1)+l*sin((pi/2)-phi);
y(a+j) = y(a+j-1)+l*cos((pi/2)-phi);
j = j+1;
end

X1_CM2 = m*sum(x)/(N*m);
Y1_CM2 = m*sum(y)/(N*m);

CM12_t = [X1_CM2,Y1_CM2]
CM12_a = [m*sum(x(1:a))/(a*m),m*sum(y(1:a))/(a*m)]
CM12_n = [m*sum(x(a+1:N))/(n*m),m*sum(y(a+1:N))/(n*m)]

CM11 =

125      0

```
