

PROJETO DE GRADUAÇÃO

INFLUÊNCIA DO ATRITO NA LOCOMOÇÃO DE ROBÔS APODAIS

Por,
Rafael França Jayme

Brasília, 22 de Junho de 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**INFLUÊNCIA DO ATRITO NA LOCOMOÇÃO DE
ROBÔS APODAIS**

POR,

Rafael França Jayme

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

Banca Examinadora

Prof. Dianne Magalhães Viana, UnB/ ENM

Prof. Carla Koike, UnB/ CIC

Prof. Flávio Vidal, UnB/ CIC

Prof. Francisco Aviani, UnB/ DIN

Brasília, 22 de Junho de 2016

Dedicatória

À minha família e, em especial, aos meus sobrinhos, que me enchem de energia ao final de cada semana.

Rafael França Jayme

Agradecimentos

Aos meus pais, por serem pessoas incríveis e uma ótima referência na vida, meus amigos, por me ajudarem a levar a vida de forma mais leve e bem humorada, à minha orientadora Dianne Magalhães, por se colocar à disposição de me ajudar com o projeto final e um agradecimento especial a todas as pessoas que passaram por minha vida, mesmo que de forma breve.

De forma mais específica, não posso deixar de mencionar o amigo Julio Glatt, por me introduzir à biomimética, John Coltrane, por me ajudar a manter o foco nas horas de estudo e Gabe Newell, por me ajudar a tirar o foco dos estudos nas horas propícias.

Rafael França Jayme

RESUMO

O objetivo deste trabalho é adaptar propriedades mecânicas para a regulação do atrito em um robô apodal, baseado na configuração bio-inspirada de uma serpente, para missões de procura e resgate em locais de difícil acesso. Um dos principais problemas de se utilizar robôs apodais, é a reprodução do atrito anisotrópico. O movimento de uma serpente depende fortemente de sua superfície anisotrópica e flexibilidade do corpo. Neste trabalho será abordada a metodologia utilizada, para a identificação dos parâmetros que influenciam o padrão de atrito anisotrópico e, com o auxílio de protótipos, serão obtidos valores experimentais que comprovam, ou não, a influência das propriedades pesquisadas.

ABSTRACT

This current work's goal is an adaptation of mechanical properties for the regulation of friction in an apodal robot, based on bio-inspired configuration of a snake for search and rescue situations on debris. One of the main problems of utilizing apodal robots is the reproduction of anisotropic friction. Snake movement relies heavily on their anisotropic skin and flexible body. In this work, will be discussed the methodology used for identifying parameters that may influence the anisotropic friction pattern and, with the help of prototypes, experimental values will be obtain in order to prove, or not, the influence of the said mechanical properties.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	4
1.2 OBJETIVOS DO PROJETO	4
1.3 ESTRUTURA DO PROJETO	4
2 FUNDAMENTOS BIOMECÂNICOS	5
2.1 SERPENTES	5
2.1.1 Anatomia das Serpentes	5
2.1.2 A Superfície das Serpentes.....	6
2.2 LOCOMOÇÃO DAS SERPENTES	7
2.3 TRABALHOS ANTERIORES EM BIOMECÂNICA	10
2.3.1 Design Mecânico dos Robôs Apodais.....	11
2.3.2 Erekebot Sigma Lily	13
3 MODELAGEM MATEMÁTICA	15
3.1 CINEMÁTICA DO ROBÔ APODAL	18
3.2 MODELAGEM DO ATRITO	21
3.2.1 Modelo de Atrito Seco.....	22
3.2.2 Modelo de Atrito Viscoso	23
3.3 DINÂMICA DO ROBÔ APODAL	24
4 METODOLOGIA PROPOSTA	28
4.1 PROTOTIPAGEM	30
4.1.1 Plástico ABS	30
5 SUPERFÍCIES DE ATRITO	32
5.1 GEOMETRIAS DETERMINÍSTICAS	32
5.1.1 Padrão Curvo.....	32
5.1.2 Padrão Hexagonal	33
5.2 TEXTURA	34
6 MEDIÇÃO DO ATRITO	37
6.1 MODELOS DE ATRITO	37
6.1.1 Modelos Simplificados.....	37
6.1.2 Modelos Complexos.....	40
6.2 MÉTODO DE MEDIÇÃO DO ATRITO	41
6.3 INFLUÊNCIA DAS GEOMETRIAS DETERMINÍSTICAS	43
6.3.1 Padrão Hexagonal Sem Textura	44
6.3.2 Padrão Curvo Sem Textura	46
6.4 INFLUÊNCIA DA TEXTURA REPRODUZIDA.....	49
6.4.1 Padrão Hexagonal Com Textura.....	49
6.4.2 Padrão Curvo Com Textura	51
7 CONCLUSÃO	54
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	57
ANEXOS	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicação de Robô apodal em situações de desabamento [Liljebäck, P. et al 2013]	1
Figura 2 - Aplicação de Robô apodal em setores industriais para inspeção [Liljebäck, P. et al 2013].....	2
Figura 3 - Possíveis aplicações de estudos provindos da robótica modular. [Hirose 2009]	2
Figura 4 - Esqueleto de uma serpente [Taxidermy Net]	5
Figura 5 - Conexão entre vértebras [SNEEL - gabriella Levine].....	6
Figura 6 - Pele de uma serpente completamente revestida por escamas. [Dreamstime.com]....	6
Figura 7 - Dependendo da região do corpo da serpente é possível enxergar diferentes perfis de escama. [AllPets].....	7
Figura 8 - Principais padrões de locomoção utilizados por serpentes.....	8
Figura 9 - Detalhamento do movimento retilíneo de uma serpente [Gmiterko, A 2012]	9
Figura 10 - Detalhamento do movimento sinuoso lateral de uma serpente. [Marvi, H. 2014]	10
Figura 11 - ACM-III [Hirose 2009]	11
Figura 12 - Robô AIKO. Utilizado como objeto de estudo de modelos matemáticos relacionados à locomoção. (Transeth, A. et al. 2008).	12
Figura 13 - Robô OT8 com propulsão de esteiras motorizadas em suas laterais. (Granosik, G. et al 2005).....	12
Figura 14 - ErekoBot Sigma Lily construído pelo Grupo Ereko.	13
Figura 15 - Parâmetros influentes na cinemática do robô apodal	16
Figura 16 - Forças atuantes em cada módulo do robô apodal	16
Figura 17 - Esquema de como as propriedades da carcaça do robô apodal devem interagir... 28	
Figura 18 - Fluxograma do processo iterativo utilizado no projeto.	29
Figura 19 - Impressora 3D "UP! Mini" utilizada na fabricação dos protótipos	30
Figura 20 - Padrão curvo das escamas ventrais da serpente naja	32
Figura 21 - Proporção dos elementos de escama ventral da serpente Naja melanoleuca	33
Figura 22 - Padrão hexagonal das escamas ventrais da serpente Python sebae	33
Figura 23 - Proporção dos elementos de escama ventral da serpente Python sebae	34
Figura 24 - Detalhamento de micro estruturas encontradas nas escamas ventrais de algumas espécies de serpentes. A) Píton-Real (Python regius), B) Jiboia (Boa constrictor), C) Cobra do leite (Lampropeltis triangulum), D) Cobra-Real (Ophiophagus hannah). [Nosonovsky, M. & Bhushan, B. 2012]	35
Figura 25 - Fileiras de fibras encontradas nas escamas ventrais de serpentes da família Python. [Abdel-Aal, H. 2012]	35
Figura 26 - Geometrias primitivas da superfície das escamas ventrais de uma serpente Python [Abdel-Aal, H. 2012].	36
Figura 27 - Resultado esperado da impressão de uma peça de geometria simples em uma máquina de prototipagem rápida com precisão no eixo Z de 0.2 mm	36
Figura 28 - Esquema representativo da força de atrito F atuando sob um corpo de massa M se movendo em uma superfície plana. [Geffen, V. 2009]	38
Figura 29 - Comportamento do atrito seco.....	38
Figura 30 - Comportamento do atrito viscoso.....	39
Figura 31 - Comportamento do atrito, como proposto pelo modelo de Stribeck.....	40
Figura 32 - Plano Inclinado Completo Aragão VII.....	42
Figura 33 - Diagrama de Corpo Livre de um corpo sob plano inclinado.....	42
Figura 34 - Resultado do protótipo de padrão hexagonal	44
Figura 35 - Resultado do protótipo de padrão curvo.....	44
Figura 36 - Direções de deslizamento da placa com padrão hexagonal.....	45

Figura 37 - Dados experimentais da placa com padrão hexagonal sem textura, na direção tangente	45
Figura 38 - Dados experimentais da placa com padrão hexagonal sem textura, na direção normal.....	45
Figura 39 - Direções de deslizamento da placa com padrão curvo	46
Figura 40 - Dados experimentais da placa com padrão curvo sem textura, na direção tangente	47
Figura 41 - Dados experimentais da placa com padrão curvo sem textura, na direção normal e face frontal convexa	47
Figura 42 - Dados experimentais da placa com padrão curvo sem textura, na direção normal e face frontal côncava.....	48
Figura 43 - Resultado da textura reproduzida com o auxílio de impressora 3D	49
Figura 44 - Dados experimentais da placa com padrão hexagonal com textura, na direção tangente	50
Figura 45 - Dados experimentais da placa com padrão hexagonal com textura, na direção normal.....	50
Figura 46 - Dados experimentais da placa com padrão curvo com textura, na direção tangente	51
Figura 47 - Dados experimentais da placa com padrão curvo com textura, na direção normal e face frontal convexa	52
Figura 48 - Dados experimentais da placa com padrão curvo com textura, na direção normal e face frontal côncava.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características e geometria de um módulo. [Guimarães, P. P. et al. 2016]	14
Tabela 2 - Parâmetros que caracterizam o robô apodal.....	17
Tabela 3 - Análise de alternativa entre os plásticos PLA e ABS	31
Tabela 4 - Resumo do experimento com placas de padrão hexagonal sem textura	46
Tabela 5 - Resumo do experimento com placas de padrão curvo sem textura	48
Tabela 6 - Resumo do experimento com placas de padrão hexagonal com textura.....	51
Tabela 7 - Resumo do experimento com placas de padrão curvo com textura	53
Tabela 8 - Comparativo entre resultados dos 4 padrões testados.....	56

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área	[m ²]
J	Momento de inércia	[kg.m ²]
l	Comprimento	[m]
L	Metade do comprimento de um módulo	[m]
p	Posição do centro de massa do robô	[m]
T	Temperatura	[°C]
m	Massa de um módulo do robô	[kg]
M	Massa total	[kg]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
f	Força	[N]
u	Torque	[N.m]
h	Força de restrição	[N]
v	velocidade	[m/s]
c	Coefficiente de viscosidade	[Pa.s]

Símbolos Gregos

θ	Ângulo de inclinação do chão em relação à direção horizontal	[°]
Φ	Ângulo de inclinação de um módulo com relação ao seu posterior	[°]
Δ	Variação entre duas grandezas similares	
Σ	Somatório	
μ	Coefficiente de atrito	
λ	Espaçamento entre picos	[mm]
ρ	Densidade	[kg/m ³]
σ	Limite de resistência	[MPa]

Grupos Adimensionais

i	i-ésimo módulo
N	Número total de módulos
\mathbf{R}	Matriz de rotação de um módulo
\mathbf{A}	Matriz de soma entre módulos
\mathbf{D}	Matriz de subtração entre módulos
\mathbf{e}	Vetor somatório

Subscritos

t	Tangente
n	Normal
f	Fibra
c	Referente à força de atrito seco
N	Referente à força normal
v	Referente à força de atrito viscosa
tra	Tração

<i>fle</i>	Flexão
<i>at</i>	Atrito
<i>Sentido</i>	Comparativo entre sentidos
<i>Direção</i>	Comparativo entre direções

Sobrescritos

- Derivada temporal
- Derivada temporal da velocidade
- Valor médio

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
FDM	Fused Deposition Modeling
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
PLA	Polylactic Acid
CM	Centro de Massa

1 INTRODUÇÃO

Robôs possuem a capacidade de se locomover utilizando apenas movimentos combinados de seu corpo, sem que haja a necessidade de utilizar rodas ou pernas, assim como serpentes. Dowling, K. (1997) indica que, em geral, esta locomoção é compreendida apenas no âmbito qualitativo, sem um entendimento aprofundado de sua mecânica e controle.

O mecanismo dos robôs modulares tem como intuito simular o movimento de uma serpente. Se inspirando em sua flexibilidade de locomoção como sua estabilidade, os robôs modulares possuem um potencial de utilização muito elevado, conforme afirma Hirose, S. (2009). Historicamente, veículos terrestres são majoritariamente equipados de rodas ou esteiras. A roda gira, o veículo é impulsionado para frente. A esteira gira, o veículo é impulsionado para frente. Para o caso dos robôs apodais, esta mecânica não é tão evidente.

A movimentação de um robô é confrontada por desafios em um ambiente não controlado. Ao se deparar com terrenos acidentados, superfícies soltas ou escorregadias, ou até mesmo em situações onde o robô está submerso, os modelos tradicionais de roda, esteira ou pernas se deparam com suas limitações. Lu, Z. et al (2016) ressalta que as serpentes são capazes de se adaptar a tais ambientes com facilidade. A robótica modular, procurando imitar a estrutura das serpentes, torna-se então um campo de pesquisa importante e promissor dentro da robótica.

Liljebäck, P. et al. (2013) ressalta a permissibilidade de se utilizar robôs apodais em diversas condições de terreno. Estes robôs são ideais para missões de procura e resgate de vítimas em caso de deslizamento ou terremoto (Figura 1), além de possuírem aplicação industrial (Figura 2), sendo capazes de realizar inspeções e intervenções em ambientes nocivos ao ser humano como plantas industriais, operações no espaço, submarinas ou simplesmente locais de difícil acesso como tubulações.



Figura 1 - Aplicação de Robô apodal em situações de desabamento [Liljebäck, P. et al 2013]

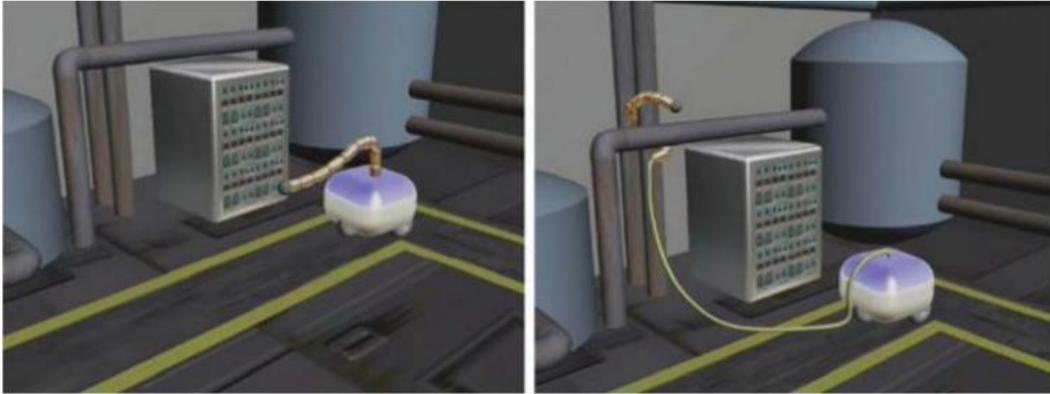


Figura 2 - Aplicação de Robô apodal em setores industriais para inspeção [Liljebäck, P. et al 2013]

Apesar de não ser o escopo desta pesquisa, as aplicações de sistemas modulares vai ainda além e deve atuar em diversos setores futuramente. Esta é a premissa de Hirose, S Yamada (2009). Listando apenas alguns, é possível imaginar a utilização de robôs apodais miniatura para exames de endoscopia como ilustrado na Figura 3(a). Na Figura 3(b) vemos a aplicação do sistema modular para envolver automaticamente um objeto a ser transportado por máquinas de elevação e transporte. Aproveitando os modelos de locomoção em situações onde a superfície é escorregadia para rodas, como no gelo, o movimento utilizado pelos robôs apodais passa a se tornar viável, como mostrado na Figura 3(c). A Figura 3(d) é uma mangueira articulada que se aproxima da origem do fogo automaticamente utilizando sistemas hidráulicos alimentados pela própria água que vai ser expelida.

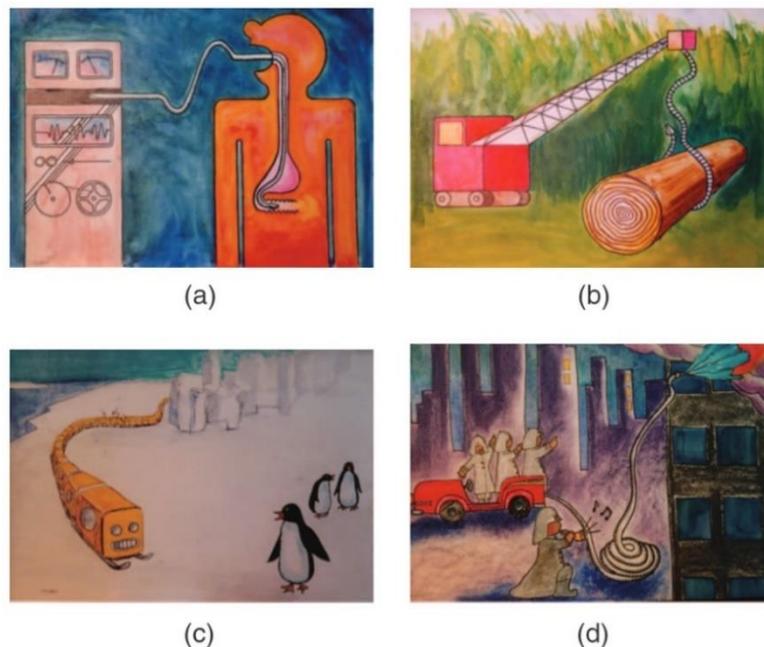


Figura 3 - Possíveis aplicações de estudos provindos da robótica modular. [Hirose 2009]

Hirose (1993) compreendeu que a base da propulsão das serpentes é o perfil de atrito anisotrópico encontrado em sua superfície, diferenciando o coeficiente de atrito transversal do normal, referente à direção do corpo da serpente. França, T. (2016) questiona o quanto o atrito afeta o movimento de robôs apodais. Enquanto a maioria dos animais vertebrados possuem movimentação baseada na inércia e momento, as serpentes dependem das forças de atrito para se locomover.

De forma análoga ao comportamento das serpentes, a performance e velocidade de um robô apodal é diretamente relacionada com o atrito de sua superfície, como indicam as pesquisas de Hopkins, J. (2009). Embora alguns modelos de locomoção das serpentes se aproveitem mais das propriedades de atrito anisotrópico que outros, de modo geral, a variação no atrito com relação à direção na qual a força é aplicada torna-se um objeto de estudo fundamental, almejando a otimização do movimento de robôs apodais.

Um dos principais constituintes de qualquer superfície sólida é a sua topografia. Superfícies são inerentemente rugosas. As propriedades da rugosidade afetam a magnitude do coeficiente de atrito e conseqüentemente, todo processo de fricção (Cuervo, P. et al. 2016). No objeto de estudo, a topografia se baseia na repetição de uma geometria determinística na superfície com dimensões e espaçamentos predefinidos.

Estudos como os de Patil, D. & Eriten, M. (2014) demonstram que além da possibilidade de controlar o coeficiente de atrito através de geometrias determinísticas, a texturização de superfícies pode resultar em diversos benefícios. A utilização de superfícies texturizadas, em conjunto com geometrias determinísticas permite uma maior previsibilidade no comportamento do atrito.

Compreendendo a importância do atrito na locomoção de robôs apodais, assim como a necessidade de se reproduzir o perfil de atrito anisotrópico em sua superfície, o presente trabalho apresenta levantamentos relativos ao estudo biomimético das serpentes, algumas formas de reproduzir os padrões encontrados na natureza para solucionar o problema proposto e a influência destes padrões nos modelos de locomoção.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Neste trabalho é abordado o problema de se reproduzir o atrito anisotrópico na superfície de um robô apodal de modo a auxiliar sua locomoção. Este problema consiste em compreender as formas de locomoção das serpentes (a serem reproduzidos pelo robô) e a influência do atrito nas mesmas. O estudo aprofundado do atrito ainda é algo muito recente, devido a sua complexidade. Como consequência disto, a bibliografia atual relativa ao tema é majoritariamente de natureza experimental.

1.2 OBJETIVOS DO PROJETO

O objetivo principal deste projeto é implementar uma metodologia de análise das superfícies de atrito em um robô apodal e sua influência na dinâmica do mesmo. Este levantamento quanto a influência do atrito se dá na forma de uma modelagem matemática que tem como intuito ser utilizada em posterior simulação computacional utilizando os valores de coeficiente de atrito a serem obtidos de forma experimental com protótipos baseados em padrões encontrados na natureza.

1.3 ESTRUTURA DO PROJETO

O Capítulo 2 visa uma análise biomecânica dos padrões de locomoção das serpentes bem como algumas considerações quanto a sua anatomia. Ao final deste, são levantados alguns trabalhos anteriores e sua forma de tratar com o problema proposto. No Capítulo 3, a modelagem matemática do problema é descrita, relacionando a dinâmica de um robô apodal de N módulos com os coeficientes de atrito transversal e normal. No Capítulo 4 é abordada a metodologia de seleção das propriedades topológicas a serem reproduzidas nos protótipos e no Capítulo 5 é descrita a maneira pela qual estas propriedades serão reproduzidas. O Capítulo 6 é composto pelo método de medição do atrito, assim como os resultados experimentais dos protótipos produzidos. Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho e a influência dos resultados em cada modelo de locomoção descrito anteriormente.

2 FUNDAMENTOS BIOMECÂNICOS

Este capítulo apresenta considerações gerais referentes à inspiração biológica dos robôs apodais bem como um levantamento das áreas a serem exploradas dentro da robótica modular com o intuito de maximizar a versatilidade de locomoção dos mesmos.

2.1 SERPENTES

2.1.1 Anatomia das Serpentes

Parker, H. (1994) ressalta que o esqueleto da maioria das serpentes consiste apenas de crânio, coluna vertebral e costelas, como ilustrado na Figura 4. A coluna vertebral possui aproximadamente entre 150 e 500 vértebras. Destas, cerca de 20% são da cauda e não possuem costelas. As vértebras do corpo possuem, cada uma, duas costelas articuladas a elas. As costelas, que compõe as laterais da vertebra, protegem os órgãos internos.



Figura 4 - Esqueleto de uma serpente [Taxidermy Net]

A conexão entre vertebras possui um padrão de junta esférica, conforme descrito por Mattison, C. (2002), e pode ser observado de forma nítida na Figura 5. Entretanto, apesar de o arranjo possibilitar a movimentação em mais de um grau de liberdade, sua rotação entre vertebras é limitada. De modo geral, a rotação relativa entre duas vértebras no plano horizontal pode vir a atingir faixas de 10° a 20° enquanto no plano vertical esta rotação se limita a uma faixa de poucos graus. Apesar dos valores de rotação relativa parecerem baixos, o movimento

das serpentes é composto pela combinação destes pequenos movimentos realizados entre vértebras. Além disto, esta limitação no movimento entre vértebras resulta em uma melhor distribuição de esforços ao longo da coluna vertebral.

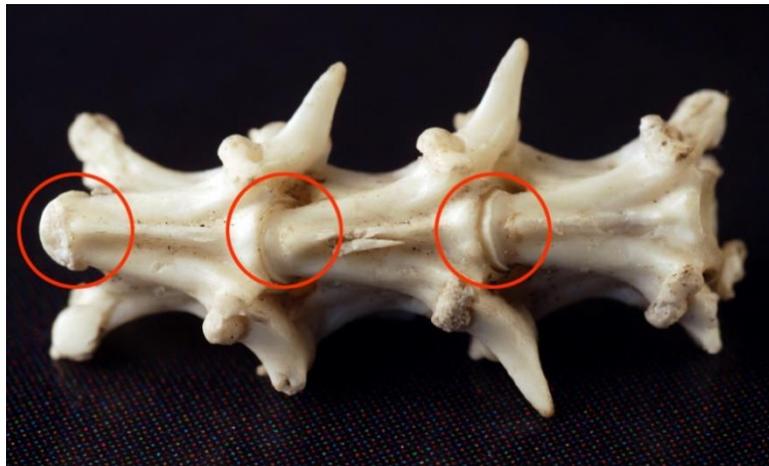


Figura 5 - Conexão entre vértebras [SNEEL - gabriella Levine]

2.1.2 A Superfície das Serpentes

A pele das serpentes é completamente revestida de escamas sendo que em cada região do corpo, encontramos um padrão diferente. Hu, D. (2009) nos informa que as escamas são responsáveis pela proteção do corpo, auxílio na locomoção e controle na umidade retida em seu exterior. O padrão de escamas laterais mais comum em serpentes é ilustrado na Figura 6 onde na esquerda é possível enxergar o corpo esticado, expondo melhor as escamas. As áreas de pele entre escamas permite a serpente flexionar seu corpo mantendo uma cobertura integral de escamas para proteção.



Figura 6 - Pele de uma serpente completamente revestida por escamas. [Dreamstime.com]

As escamas ventrais, possuem aparência lisa e geometria alongada. Liljebäck, P. et al (2013) informa que, de forma geral, as escamas ventrais possuem perfil convexo, apontando para a direção tangente ao corpo da serpente, enquanto na cauda este perfil é hexagonal (Figura 7).

Estas escamas, dentre as outras, são as mais influentes na movimentação das serpentes, pelo fato de propiciar um coeficiente de atrito anisotrópico na região que onde há contato com o solo. Isto significa que temos um coeficiente de atrito maior quando uma força é aplicada na direção transversal ao corpo da serpente, comparado com o coeficiente obtido em esforços na direção tangente à sua direção. A diferença nos coeficientes de atrito proporcionada pelas escamas contribui na redução de esforço em regiões específicas, o que resulta em uma diminuição de esforços na locomoção. Com intuito semelhante, o mesmo perfil anisotrópico de atrito pode de ser visualizado na pata de alguns insetos.

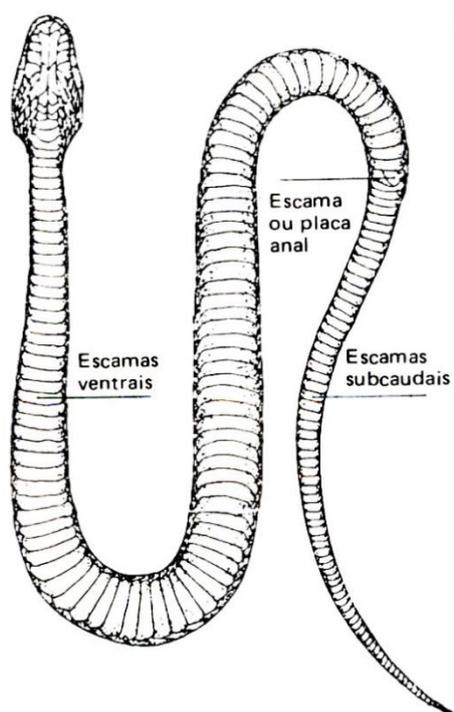
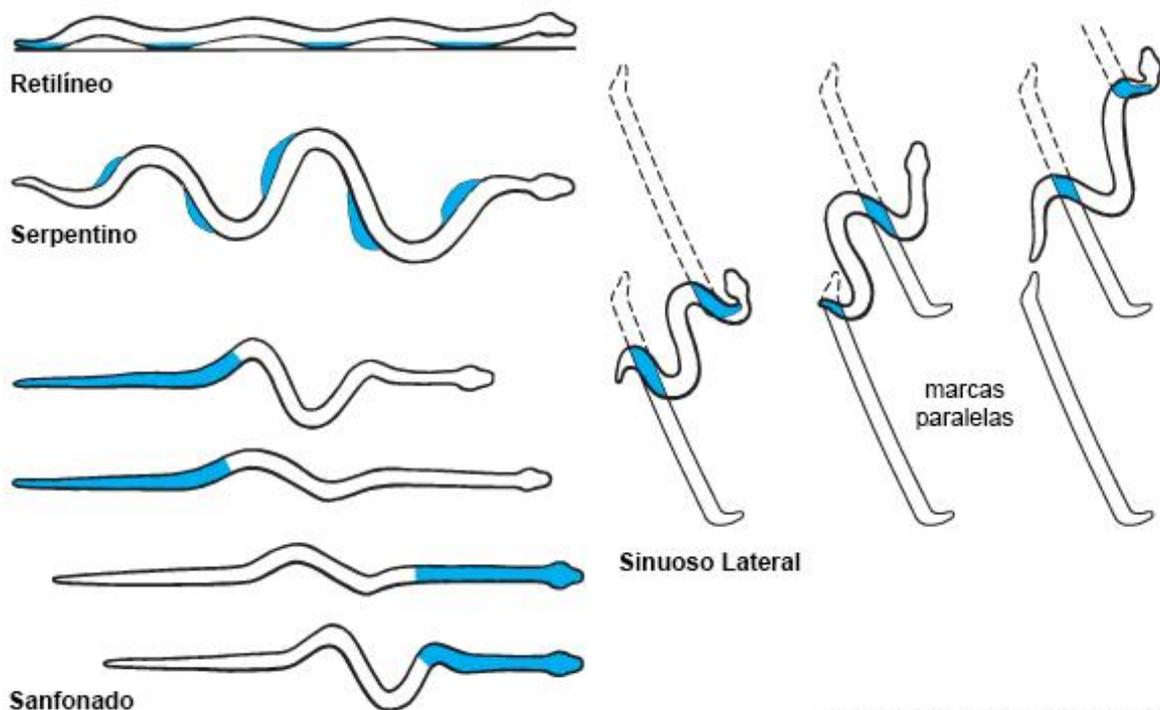


Figura 7 - Dependendo da região do corpo da serpente é possível enxergar diferentes perfis de escama. [AllPets]

2.2 LOCOMOÇÃO DAS SERPENTES

As serpentes são os únicos animais vertebrados que não possuem ao menos um par de pernas. Apesar da limitação, esta ausência de membros acaba por favorecer à serpente uma locomoção estável, robusta e versátil. Por outro lado, sua velocidade de locomoção é relativamente baixa, quando comparada à de animais bípedes ou quadrúpedes, apesar de algumas espécies como a *Mamba negra* conseguirem alcançar velocidade de até 20 quilômetros por hora (National Geographic 2007). A Figura 8 ilustra os principais padrões de locomoção utilizados por serpentes.

Locomoção das cobras



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

Figura 8 - Principais padrões de locomoção utilizados por serpentes.

A descrição dos modelos de locomoção das serpentes são baseadas nas informações adquiridas em Hirose, S (1993), Hu, D. et al. (2009), Mattison, C. (2002) e Parker, H. (1977)

Movimento Retilíneo

A movimentação retilínea é uma das formas mais lentas de se locomover e costuma ser utilizada em serpentes de corpo volumoso e pesado. Este tipo de movimento também é empregado no momento que antecede ao ataque a uma presa, uma vez que apesar de ser uma movimentação lenta, esta é também uma das formas mais silenciosas e discretas de se locomover. Durante o movimento retilíneo, as serpentes utilizam as pontas de suas escamas para ancorar e empurrar o corpo para frente. Esta operação consiste em esticar o corpo para frente e utilizar pequenas irregularidades no terreno como apoio, e só então puxar o parte de trás do corpo até este ponto. Pontos alternativos do corpo se esticam e se encolhem ao mesmo tempo. Este padrão de movimentação é ilustrado na Figura 8, alto à esquerda, e detalhado na Figura 9.

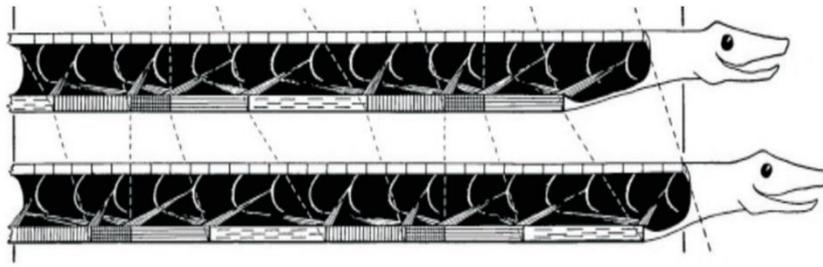


Figura 9 - Detalhamento do movimento retilíneo de uma serpente [Gmiterko, A 2012]

Movimento Serpentino

Também chamado de movimento ondulatório horizontal, esta é a forma mais comum e mais rápida das serpentes se movimentarem. A serpente ondula o corpo de forma alternada para um lado e para o outro, empurrando seu corpo contra irregularidades nas superfícies e impulsionando o restante do corpo para frente. A medida em que a serpente vai se locomovendo, todos os pontos ao longo do corpo passam pelos mesmos pontos no chão. A distribuição de peso durante o movimento ondulatório não é uniforme, mas sim distribuído de modo que as extremidades curvas de seu corpo estejam ligeiramente levantadas.

Movimento Sanfonado

Muito utilizado em situações onde a serpente está em ambientes estreitos, o movimento sanfonado pode ser descrito como uma combinação dos movimentos retilíneo e serpentino e pode ser visualizado na Figura 8. Neste caso, o movimento é composto pelo alongamento da parte frontal do corpo enquanto a parte traseira está curvada algumas vezes, devido ao maior atrito no sentido transversal ao corpo da serpente, e em seguida, a ancoragem se faz por conta da parte frontal do corpo, permitindo o avanço da parte traseira. Esta sequência de movimentos é então repetida, de forma que a serpente se comprime e se estica conforme sua trajetória. Não ser o padrão de movimento mais eficiente, mas em alguns casos, é a única solução.

Movimento Sinuoso lateral

Esta forma de locomoção é principalmente adotada por serpentes do deserto, que vivem em ambientes arenosos. Neste movimento, a serpente eleva seu corpo em alça, apoiando apenas dois pontos do corpo no solo de cada vez. Estas alças são então impulsionadas para frente,

elevadas do chão, enquanto o restante do corpo age como âncora. Assim que estas alças estão à frente do restante do corpo, a situação se inverte e elas passam a agir como âncora para o restante do corpo. A impressão que se dá é que a serpente anda de lado. Este movimento é ilustrado pela Figura 10.

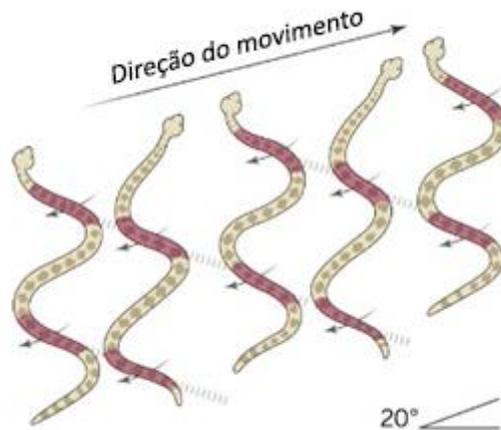


Figura 10 - Detalhamento do movimento sinuoso lateral de uma serpente. [Marvi, H. 2014]

2.3 TRABALHOS ANTERIORES EM BIOMECÂNICA

As pesquisas na área de biomecânica utilizando serpentes como objeto de estudo se iniciaram com o matemático J. Gray (1946). Em seus estudos, Gray descreveu as forças atuantes na locomoção das serpentes e concluiu que para se propulsionar para frente em um sistema plano, as serpentes precisam se utilizar de forças atuando no sentido normal ao seu corpo.

Posteriormente, Hirose, S. (1974) modelou o corpo das serpentes como uma curva contínua em situações onde não há deslizamento no sentido transversal (simulando o efeito das escamas ventrais). Com estas considerações, Hirose foi capaz de descrever como as serpentes transformam os esforços exercidos por seus músculos em propulsão, possibilitando a realização de estimativas de gasto energético para sua locomoção.

Direcionado ao atrito, estudos recentes de Hu, D. et al (2009) investigam as propriedades das escamas e da pele das serpentes tanto de forma matemática quanto experimental. Foi somente então que o atrito anisotrópico presente nas serpentes foi propriamente descrito. Além das contribuições com relação à superfície das serpentes, Hu também provou que a distribuição de peso das serpentes no movimento serpentino não é uniforme e denominou o içamento que as serpentes fazem com a parte curva de seu corpo como “*sinus lifting*”.

2.3.1 Design Mecânico dos Robôs Apodais

Robôs Apodais Com Rodas

Inspirados nos estudos de Hirose (1972), estes modelos foram elaborados com o intuito de favorecer a movimentação no sentido tangente à direção do corpo e impedir a movimentação no sentido normal utilizando material aderente nas extremidades das rodas. Estes robôs possuem a limitação de realizar apenas movimentos planos, sendo incapazes de se mover na vertical. Alguns destes robôs possuem revestimento nas conexões entre módulos, protegendo os mecanismos internos da entrada de poeira, lama ou água enquanto modelos mais simples são utilizados apenas com intuito experimental, em laboratórios. Visto na Figura 11, o robô ACM-III criado por Hirose em 1972 é um dos pioneiros de robótica apodal, com 2 m de comprimento, 28 kg de massa total e sendo capaz de atingir uma velocidade relativa de $v = 40 \text{ cm/s}$ através do movimento serpentino.

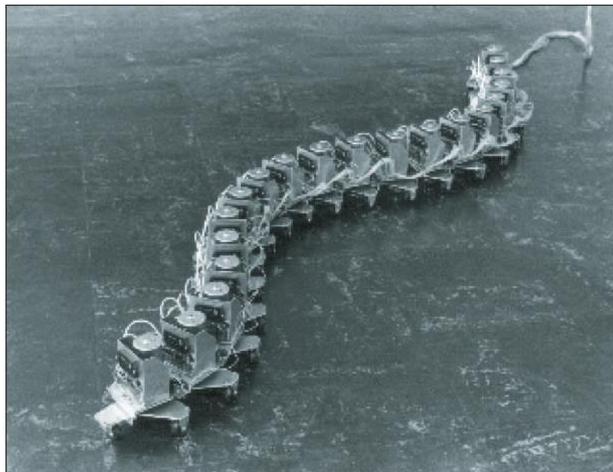


Figura 11 - ACM-III [Hirose 2009]

Robôs Apodais sem Rodas

Estes robôs apresentam características mais fiéis às das serpentes. Com o intuito de simular as propriedades de atrito anisotrópico em sua superfície, algumas soluções são adotadas como a implementação de quinas ou ranhuras na região inferior do robô. Comparado com os robôs que se utilizam de rodas para restringir o deslizamento no sentido transversal ao corpo, estes robôs possuem maior variação de aplicabilidade como por exemplo, subir tubulações verticais. Por ser uma área de pesquisa recente, a maioria dos robôs encontrados com esta configuração ainda apresentam atrito isotrópico e costumam utilizar o movimento serpentino para se locomoverem, com auxílio do levantamento senoidal. Com massa total de 7 kg e 1.5 m de comprimento, o robô AIKO desenvolvido na NTFU/SINTEF Advanced Robots Laboratory

(Figura 12) é capaz de se locomover a uma velocidade relativa de $v = 10 \text{ cm/s}$ através do movimento serpentino com atrito isotrópico em sua superfície (Transeth, A. et al. 2008).



Figura 12 - Robô AIKO. Utilizado como objeto de estudo de modelos matemáticos relacionados à locomoção. (Transeth, A. et al. 2008).

Robôs Apodais com Sistema de Propulsão

Agindo de forma conjunta, estes robôs utilizam juntas articuladas e sistemas de propulsão em cada um de seus módulos para atingir uma locomoção mais dinâmica. Os modelos mais comuns de propulsão utilizam rodas motorizadas, esteiras ou até mesmo braços mecânicos para casos onde o robô também se locomova dentro da água. A ideia neste conceito é preencher ao máximo a superfície do robô com elementos de propulsão, de modo que mesmo em terrenos irregulares, a locomoção seja eficiente. Desenvolvido com uma parceria entre a *University of Michigan* (EUA) e a *Technical University of Łódź* (Polônia), o OT8 (Figura 13) é equipado com esteiras motorizadas em todos os seus cinco módulos. Com massa total de 12 kg e comprimento de 1.16 m , este robô é capaz de alcançar áreas de difícil acesso a uma velocidade de $v = 10 \text{ cm/s}$ (Granosik, G. et al 2005).



Figura 13 - Robô OT8 com propulsão de esteiras motorizadas em suas laterais. (Granosik, G. et al 2005)

2.3.2 Erekebot Sigma Lily

O Grupo Ereko, responsável pelo Erekebot Sigma Lily, é um grupo de pesquisa da Universidade de Brasília (UnB) que almeja a construção e operações de robôs apodais funcionais.

O protótipo Erekebot Sigma Lily (Figura 14), o qual serviu de inspiração para este trabalho, foi desenvolvido durante o ano de 2015. Este robô é constituído de uma série de módulos conectados em série, com 1 grau de liberdade em cada módulo. Com design semelhante aos modelos passados, os módulos deste robô são híbridos, com quatro faces de conexão idênticas com controle simples de movimento. Sua geometria é similar a um cubo com corte semicilíndrico e com face móvel. Esta face é soldada ao braço que, por sua vez, é conectado ao servomotor localizado no interior da gaiola.

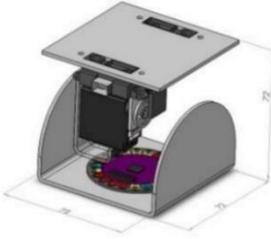


Figura 14 - ErekeBot Sigma Lily construído pelo Grupo Ereko.

A estrutura de cada modulo consiste de 4 partes: O corpo, o suporte para o motor, o shaft do motor e a placa frontal, como demonstrado na Tabela 1. Os componentes do corpo foram construídos com placas de Policloreto de polivinila (PVC) de 2mm de espessura. Já o suporte foi produzido em Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) com o auxílio de uma impressora 3D (Guimarães, P. P. et al. 2016).

Utilizando as características do Erekebot Sigma Lily como referência, deu-se início a modelagem matemática que relaciona as forças de atrito atuantes em um robô apodal com 1 grau de liberdade e sua dinâmica.

Tabela 1 - Características e geometria de um módulo. [Guimarães, P. P. et al. 2016]

Características	Especificação	Modelo Geométrico
Sensores	proximidade acelerômetro giroscópio	
Locomoção	1 grau de liberdade progressão longitudinal	
Dimensão	72x72x72 mm	
Massa	126 g	
Carregamento	fonte externa	
Ação	terrestre	
Servomotor	3,0 a 3,5 kg.cm	

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Este capítulo trata da modelagem matemática do robô apodal relacionando a movimentação de seus módulos com os fatores de atrito. Esta modelagem torna possível uma posterior simulação computacional do robô, que tem como intuito realizar um levantamento da influência de cada variável no comportamento do mesmo.

Com intuito de entender melhor a influência de cada variável na dinâmica do robô, a modelagem matemática da movimentação prevista e das forças influentes torna-se crucial para o estudo analítico. Neste trabalho, algumas considerações foram tomadas:

- A modelagem prevê a movimentação do robô em uma superfície plana e horizontal;
- Todos os módulos do robô são influenciados pelas forças de atrito da superfície;
- Os parâmetros de posição são resumidos no CG de cada módulo.

A escolha do sistema da superfície plana e horizontal foi feita com intuito de isolar as variáveis que são objeto de estudo, isto é, os coeficientes de atrito tangente e normal. Tendo em vista que o sistema está disposto em condição de não deslizamento, o robô possui condições de se locomover. De acordo com o modelo proposto por Liljebäck, P. et al. (2013), a descrição do atrito e das dinâmicas exercidas pelo robô é feita na forma matricial. De tal modo, alguns conceitos de notação utilizados precisam estar bem claros pois serão repetidos ao longo da pesquisa.

- O operador $sgn(\cdot)$ produz um vetor contendo o sinal de cada elemento individual em seu argumento. $(-1, 0, 1)$;
- O operador $diag(\cdot)$ produz uma matriz composta apenas pelos elementos contidos na diagonal de seu argumento;
- Os operadores seno e cosseno, $sen(\cdot)$ e $cos(\cdot)$, fornecem operadores vetoriais quando seu argumento for um vetor e operadores escalares quando seu argumento for escalar;
- A identificação dos módulos é realizada pela utilização do subscrito i ;
- Símbolos que representam vetores ou matrizes são indicados com a fonte em negrito;

- A matriz I_k representa a identidade da matriz quadrada $k \times k$ enquanto $\mathbf{0}_{i \times j}$ representa a matriz $i \times j$ de zeros.
- O vetor relacionado ao módulo i do robô é expresso por coordenadas globais do sistema ou coordenadas locais, referentes ao módulo anterior. Esta identificação é realizada com o sobrescrito *global* ou *módulo*, i , respectivamente. Caso não seja indicado, deve-se assumir que o vetor está expresso nas coordenadas globais do sistema.

Considerando que o robô apodal seja formado por N módulos rígidos de comprimento $2l$ e conectados por $N - 1$ juntas motorizadas onde o comprimento destas juntas é desprezado, todos os módulos tem a mesma massa m e possuem momento de inércia J

$$J = \frac{1}{3} ml^2 \quad (1)$$

A massa dos módulos está distribuída de maneira uniforme, de modo que o centro de massa (CM) esteja localizado no centro de gravidade do módulo, isto é, à distância l da junta. A Figura 15 ilustra os parâmetros influentes na cinemática do robô apodal, enquanto a Figura 16 descreve as forças atuantes em cada módulo do robô.

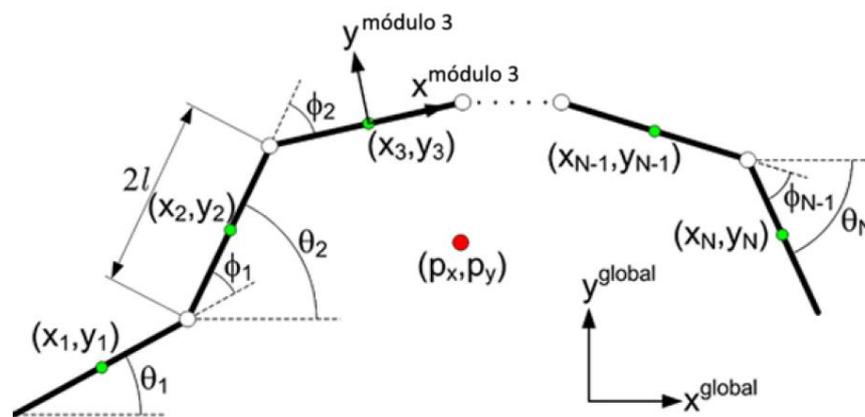


Figura 15 - Parâmetros influentes na cinemática do robô apodal

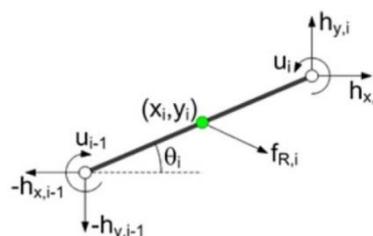


Figura 16 - Forças atuantes em cada módulo do robô apodal

Para a modelagem das forças de atrito e da dinâmica do robô, alguns operadores serão utilizados como a matriz de adição **A** e a matriz de diferença **D**. Em algumas etapas, também é utilizado o vetor **e**, que representa um vetor somatório de todos os elementos contidos em um vetor N -dimensional. A Tabela 2 descreve os parâmetros característicos de um robô apodal e o conjunto de equações (2) descreve os operadores mencionados anteriormente.

Tabela 2 - Parâmetros que caracterizam o robô apodal

Símbolo	Descrição	Vetor
N	Número de módulos	
l	Metade do comprimento de um módulo	
m	Massa de cada módulo	
J	Momento de inércia de cada módulo	
θ_i	Ângulo entre o módulo l e o eixo de coordenadas global x	$\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^N$
ϕ_i	ângulo de junta i relativo ao módulo anterior	$\boldsymbol{\phi} \in \mathbb{R}^{N-1}$
(x_i, y_i)	Coordenada global do CM do módulo i	$\mathbf{X}, \mathbf{Y} \in \mathbb{R}^N$
(p_x, p_y)	Coordenada global do CM do robô	$\mathbf{p} \in \mathbb{R}^2$
u_i	Torque atuante no módulo i derivado do módulo $i+1$	$\mathbf{u} \in \mathbb{R}^{N-1}$
u_{i-1}	Torque atuante no módulo i derivado do módulo $i-1$	$\mathbf{u} \in \mathbb{R}^{N-1}$
$(f_{R,x,i}, f_{R,y,i})$	Força de atrito no módulo i	$\mathbf{f}_{R,x}, \mathbf{f}_{R,y} \in \mathbb{R}^N$
$(h_{x,i}, h_{y,i})$	Força de restrição na junta do módulo l com o módulo $i+1$	$\mathbf{h}_x, \mathbf{h}_y \in \mathbb{R}^{N-1}$
$-(h_{x,i-1}, h_{y,i-1})$	Força de restrição na junta do módulo l com o módulo $i-1$	$\mathbf{h}_x, \mathbf{h}_y \in \mathbb{R}^{N-1}$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & & & \\ & \cdot & \cdot & & \\ & & \cdot & \cdot & \\ & & & 1 & 1 \\ & & & & \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(N-1) \times N}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & & & \\ & \cdot & \cdot & & \\ & & \cdot & \cdot & \\ & & & 1 & -1 \\ & & & & \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(N-1) \times N}$$

(2)

$$\mathbf{e} = [1, \dots, 1]^T \in \mathbb{R}^N$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{e} & \mathbf{0}_{N \times 1} \\ \mathbf{0}_{N \times 1} & \mathbf{e} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2N \times 2}$$

$$\mathbf{sen} \boldsymbol{\theta} = [\mathbf{sen} \theta_1, \dots, \mathbf{sen} \theta_N]^T \in \mathbb{R}^N$$

$$\mathbf{S}_\theta = \mathit{diag}(\mathbf{sen} \boldsymbol{\theta}) \in \mathbb{R}^{N \times N}$$

$$\cos \theta = [\cos \theta_1, \dots, \cos \theta_N]^T \in \mathbb{R}^N \quad \mathbf{C}_\theta = \text{diag}(\cos \theta) \in \mathbb{R}^{N \times N}$$

$$\text{sgn} \theta = [\text{sgn} \theta_1, \dots, \text{sgn} \theta_N]^T \in \mathbb{R}^N \quad \dot{\theta} = [\dot{\theta}_1^2, \dots, \dot{\theta}_N^2] \in \mathbb{R}^N$$

3.1 CINEMÁTICA DO ROBÔ APODAL

Como visto na *Figura 15*, para um robô composto por N módulos movendo-se em um plano horizontal, temos um sistema de $N + 2$ graus de liberdade $(x, y, \theta_1, \dots, \theta_N)$.

O ângulo $\theta_i \in \mathbb{R}$ é definido pela ângulo formado entre o módulo $i \in \{1, \dots, N\}$, em questão, com relação ao eixo de coordenadas global x . Esta variável foi nomeada de *ângulo de módulo* e possui sinal positivo no sentido anti-horário.

Para obter os dados relativos ao ângulo formado pelas juntas entre módulos, define-se o *ângulo de junta* $\phi_i \in \mathbb{R}$ da forma:

$$\phi_i = \theta_i - \theta_{i+1}. \quad (3)$$

Como o robô é composto por ângulos independentes entre cada conjunto módulos, não é possível identificar uma orientação explícita seguida pelo robô. Apesar disto, Hatton, R. & Choset, H. (2009) e Hu (2009) desenvolveram uma metodologia para identificar a direção na qual o robô está orientado, definindo o ângulo de orientação $\bar{\theta} \in \mathbb{R}^2$ como sendo a média dos ângulos de módulo.

$$\bar{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_i. \quad (4)$$

Uma vez considerado que o centro de massa de cada módulo está contido em seu centro geométrico, deve-se alinhar sua componente tangencial x e a componente normal y com as respectivas coordenadas globais x e y quando o ângulo de módulo for nulo. A matriz de rotação capaz de transferir um vetor de referencial global para o referencial de um módulo i é definida por:

$$\mathbf{R}_{\text{módulo},i}^{\text{global}} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\text{sen} \theta_i \\ \text{sen} \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Para mapear a posição do centro de massa do robô completo dentro dos eixos de coordenada global x e y , estabelece-se o vetor posição $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^2$ como

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Nm} \sum_{i=1}^N mx_i \\ \frac{1}{Nm} \sum_{i=1}^N my_i \end{bmatrix} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} \mathbf{e}^T \mathbf{X} \\ \mathbf{e}^T \mathbf{Y} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

A partir do vetor posição do centro de massa do robô e do seu ângulo de orientação, é possível estipular a velocidade de locomoção do mesmo através do vetor velocidade $\bar{v} \in \mathbb{R}$ denominado *velocidade de avanço*:

$$\bar{v} = \dot{p}_x \cos \bar{\theta} + \dot{p}_y \sin \bar{\theta}. \quad (7)$$

Considerando os conceitos listados no início do Cap. 3, desprezando o comprimento das conexões entre módulos i e $i + 1$, pode-se citar as coordenadas de um módulo em relação à seu anterior da forma:

$$x_{i+1} - x_i = l \cos \theta_i + l \cos \theta_{i+1}, \quad (8a)$$

$$y_{i+1} - y_i = l \sin \theta_i + l \sin \theta_{i+1}. \quad (8b)$$

Com auxílio dos operadores descritos na mesma seção, é possível reescrever estas coordenadas como:

$$\mathbf{DX} + l\mathbf{A} \cos \theta = \mathbf{0}, \quad (9a)$$

$$\mathbf{DY} + l\mathbf{A} \sin \theta = \mathbf{0}. \quad (9b)$$

Ao isolar as variáveis X e Y descritas nas equações 9a e 9b, pode-se substituir os valores encontrados na equação 4 obtendo uma expressão para o posicionamento de cada módulo individual em função da posição de seu centro de massa e dos ângulos de módulo.

$$\mathbf{TX} = \begin{bmatrix} -l\mathbf{A} \cos \theta \\ p_x \end{bmatrix}, \quad (10a)$$

$$\mathbf{TY} = \begin{bmatrix} -l\mathbf{A} \sin \theta \\ p_y \end{bmatrix}, \quad (10b)$$

onde:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ \frac{1}{N} \mathbf{e}^T \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N \times N}. \quad (11)$$

Sabendo que, por definição, $\mathbf{T} \cdot \mathbf{T}^{-1} = \mathbf{I}$, pode-se escrever a matriz inversa de \mathbf{T} como:

$$\mathbf{T}^{-1} = [\mathbf{D}^T (\mathbf{D}\mathbf{D}^T)^{-1} \quad \mathbf{e}], \quad (12)$$

que ao ser multiplicada nas equações 10a e 10b, fornece:

$$\mathbf{X} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} -l\mathbf{A} \cos \theta \\ p_x \end{bmatrix} = -l\mathbf{K}^T \cos \theta + \mathbf{e}p_x, \quad (13a)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} -l\mathbf{A} \sin \theta \\ p_y \end{bmatrix} = -l\mathbf{K}^T \sin \theta + \mathbf{e}p_y. \quad (13b)$$

Sendo que $\mathbf{K} = \mathbf{A}^T (\mathbf{D}\mathbf{D}^T)^{-1} \mathbf{D} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ e seu elemento $\mathbf{D}\mathbf{D}^T$ é irreversível. Com as definições atualizadas para o posicionamento dos módulos, deriva-se as variáveis com o intuito de se obter as velocidades lineares

$$\dot{\mathbf{X}} = l\mathbf{K}^T \mathbf{S}_\theta \dot{\theta} + \mathbf{e}\dot{p}_x, \quad (14a)$$

$$\dot{\mathbf{Y}} = -l\mathbf{K}^T \mathbf{C}_\theta \dot{\theta} + \mathbf{e}\dot{p}_y. \quad (14b)$$

Decompondo os elementos contidos nas equações 13a e 13b, é possível observar que a velocidade linear do centro de massa de um módulo específico i em função do eixo de coordenadas global x e y é

$$\dot{x}_i = \dot{p}_x - \zeta_i \mathbf{S}_\theta \dot{\boldsymbol{\theta}}, \quad (15a)$$

$$\dot{y}_i = \dot{p}_y - \zeta_i \mathbf{C}_\theta \dot{\boldsymbol{\theta}}, \quad (15b)$$

onde, com o intuito de simplificar as equações 15a e 15b, foram introduzidas as seguintes variáveis

$$\zeta_i = \left[a_1, a_2, \dots, a_{i-1}, \frac{a_i + b_i}{2}, b_{i+1}, b_{i+2}, \dots, b_N \right], \quad (16)$$

$$a_i = \frac{l(2i - 1)}{N}, \text{ e} \quad (17)$$

$$b_i = \frac{l(2i - 1 - 2N)}{N}. \quad (18)$$

3.2 MODELAGEM DO ATRITO

O atrito é uma força de reação tangencial que ocorre entre duas superfícies em contato. O estudo da capacidade de controlar o atrito e reduzir o desgaste de um material começou no século XV com Leonardo da Vinci, buscando formas de aumentar a eficiência de partes móveis de máquinas e equipamentos. Sendo objeto de estudo até hoje, o que está claro com relação ao atrito é que ele não depende apenas do material do qual são feitas as superfícies atritantes mas sim de uma série de outros fatores como o tempo de contato, a velocidade relativa entre as superfícies e a temperatura e umidade do ambiente. Até hoje, as leis do atrito propostas por Guillaume Amontou (1706) ainda estão em vigência. Estas leis nos informam que

- A força de atrito é diretamente proporcional à carga aplicada sob o corpo;
- A força de atrito é independente da área de contato;

Sabendo que as serpentes se locomovem alterando a forma de seu corpo, ancorando regiões com o intuito de se impulsionar para frente, torna-se evidente que o atrito é uma parte fundamental na dinâmica do robô apodal. As leis do atrito de Amontou se aplicam apenas ao atrito seco. Os estudos relativos ao atrito viscoso se iniciaram em meados de 1880, com o auxílio de Nikolai Pavlovich Petrov e Osborne Reynolds (Archard, J. 1975). Utilizando da

bibliografia clássica e estudos mais recentes como os de Hu (2009), é possível realizar uma modelagem das forças de atrito atuantes no robô apodal

Como visto na sessão 2.1.2 A , a superfície das serpentes possui características de atrito anisotrópico, o que significa que o coeficiente de atrito na direção tangencial ao seu corpo é diferente do coeficiente de atrito na direção normal ao mesmo. Com o intuito de aproximar a modelagem à situação ideal, o atrito que ocorre na superfície dos módulos será considerada como anisotrópico. Os modelos de atrito abordados nesta pesquisa são de atrito seco (Coulomb) e de atrito viscoso, de modo semelhante à pesquisa de Kalani, H. (2011). De modo geral, assume-se que a força de atrito resultante no módulo i atua apenas em seu centro de massa, de modo que

$$\mathbf{f}_{R,i} = \mathbf{f}_{R,i}^{global} = \begin{bmatrix} f_{R,x,i} \\ f_{R,y,i} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^2 . \quad (19)$$

De forma análoga, as forças de atrito atuantes em todos os módulos do robô apodal podem ser descritas na forma:

$$\mathbf{f}_R = \begin{bmatrix} f_{R,x} \\ f_{R,y} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2N} , \quad (20)$$

onde $f_{R,x} = [f_{R,x,1}, \dots, f_{R,x,N}]^T \in \mathbb{R}^N$ e $f_{R,y} = [f_{R,y,1}, \dots, f_{R,y,N}]^T \in \mathbb{R}^N$ apresentam as forças de atrito nos módulos do robô em relação aos eixos de coordenadas global x e y , respectivamente.

3.2.1 Modelo de Atrito Seco

O modelo de atrito seco assume que a força de atrito em um módulo é diretamente proporcional ao peso do mesmo, como proposto pela primeira lei do atrito de Amonton. Nesta descrição, foi considerado que o atrito na tangencial atua no eixo x do módulo e o atrito normal atua no eixo y do mesmo. Os coeficientes de atrito nas direções tangencial e normal são denominados μ_t e μ_n , respectivamente. Define-se então a força resultante do atrito em um determinado módulo i na forma

$$\mathbf{f}_{R,i}^{módulo i} = -mg \begin{bmatrix} \mu_t & 0 \\ 0 & \mu_n \end{bmatrix} \text{sgn}(\mathbf{v}_i^{módulo i}) , \quad (21)$$

onde $\mathbf{v}_i^{módulo i} \in \mathbb{R}^2$ representa a velocidade do módulo em questão e g é a constante de aceleração da gravidade. Para se obter esta relação de forças referentes ao eixo de coordenadas global, deve-se aplicar (5) em (19), obtendo

$$\begin{aligned}
\mathbf{f}_{R,i} &= \mathbf{f}_{R,i}^{global} = \mathbf{R}_{módulo i}^{global} \mathbf{f}_{R,i}^{módulo i} \\
&= -mg \mathbf{R}_{módulo i}^{global} \begin{bmatrix} \mu_t & 0 \\ 0 & \mu_n \end{bmatrix} \text{sgn}(\mathbf{v}_i^{módulo i}) \\
&= -mg \mathbf{R}_{módulo i}^{global} \begin{bmatrix} \mu_t & 0 \\ 0 & \mu_n \end{bmatrix} \text{sgn}\left(\left(\mathbf{R}_{módulo i}^{global}\right)^T \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{bmatrix}\right). \tag{22}
\end{aligned}$$

Utilizando a multiplicação matricial descrita em (22) e adaptando as forças atuantes nos módulos de acordo com a forma matricial, pode-se reescrever a equação (10) da força de atrito seca relativa ao eixo de coordenadas global como:

$$\mathbf{f}_R = \begin{bmatrix} f_{R,x} \\ f_{R,y} \end{bmatrix} = -mg \begin{bmatrix} \mu_t \mathbf{C}_\theta & -\mu_n \mathbf{S}_\theta \\ \mu_t \mathbf{S}_\theta & \mu_n \mathbf{C}_\theta \end{bmatrix} \text{sgn}\left(\begin{bmatrix} \mathbf{C}_\theta & \mathbf{S}_\theta \\ -\mathbf{S}_\theta & \mathbf{C}_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}} \\ \dot{\mathbf{Y}} \end{bmatrix}\right) \in \mathbb{R}^{2N}. \tag{23}$$

3.2.2 Modelo de Atrito Viscoso

O modelo de atrito viscoso é principalmente utilizado em situações onde o robô se encontra submerso em água ou mesmo na lama. Apesar de o Erekobot Sigma Lily não possuir um sistema de vedação adequado para se locomover nestes meios, a modelagem matemática desta forma de atrito foi realizada com o intuito de auxiliar pesquisas futuras.

A abordagem para este modelo é feita de modo semelhante à utilizada no modelo de atrito seco. As forças de atrito atuam apenas no centro de massa dos módulos e o atrito considerado é descrito na forma anisotrópica. Os coeficientes de viscosidade tangente e normal, denominados c_t e c_n respectivamente, influenciam as forças de reação relacionadas ao atrito viscoso no módulo i do robô de modo que

$$\mathbf{f}_{R,i}^{módulo i} = - \begin{bmatrix} c_t & 0 \\ 0 & c_n \end{bmatrix} \mathbf{v}_i^{módulo i}, \tag{24}$$

onde a velocidade de módulo $\mathbf{v}_i^{modulo\ i}$ é expressa em termos do eixo de coordenadas relativa ao mesmo. Com auxílio da equação (5), podemos reescrever (19) para as forças atuantes no modelo de atrito viscoso na forma

$$\begin{aligned}\mathbf{f}_{R,i} &= \mathbf{f}_{R,i}^{global} = \mathbf{R}_{módulo\ i}^{global} \mathbf{f}_{R,i}^{módulo\ i} \\ &= -\mathbf{R}_{módulo\ i}^{global} \begin{bmatrix} c_t & 0 \\ 0 & c_n \end{bmatrix} \mathbf{v}_i^{modulo\ i} \\ &= -\mathbf{R}_{módulo\ i}^{global} \begin{bmatrix} c_t & 0 \\ 0 & c_n \end{bmatrix} (\mathbf{R}_{módulo\ i}^{global})^T \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{bmatrix}.\end{aligned}\quad (25)$$

Posteriormente, ao completar a multiplicação das matrizes propostas em (25), obtém-se:

$$\mathbf{f}_R = \begin{bmatrix} f_{R,x} \\ f_{R,y} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} c_t \cos^2 \theta_i + c_n \sin^2 \theta_i & (c_t - c_n) \sin \theta_i \cos \theta_i \\ (c_t - c_n) \sin \theta_i \cos \theta_i & c_t \sin^2 \theta_i + c_n \cos^2 \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{bmatrix}.\quad (26)$$

Adaptando as forças atuantes nos módulos de acordo com a forma matricial, pode-se reescrever a equação (26) da força de atrito viscosa relativa ao eixo de coordenadas global como

$$\mathbf{f}_R = \begin{bmatrix} f_{R,x} \\ f_{R,y} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} c_t (\mathbf{C}_\theta)^2 + c_n (\mathbf{S}_\theta)^2 & (c_t - c_n) \mathbf{S}_\theta \mathbf{C}_\theta \\ (c_t - c_n) \mathbf{S}_\theta \mathbf{C}_\theta & c_t (\mathbf{S}_\theta)^2 + c_n (\mathbf{C}_\theta)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}} \\ \dot{\mathbf{Y}} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2N}.\quad (27)$$

3.3 DINÂMICA DO ROBÔ APODAL

Nesta seção, serão deduzidas as equações relacionadas à movimentação do robô apodal em termos da aceleração do centro de massa de seus módulos, $\ddot{\mathbf{p}}$, e da aceleração angular dos respectivos, $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$. Como apresentado na Figura 16, os módulos do robô são influenciados pelas forças de atrito $\mathbf{f}_{R,i} \in \mathbb{R}^2$ que agem no centro de massa de cada módulo, assim como forças de restrição $-h_{x,i-1}$, $-h_{y,i-1}$, $h_{x,i}$ e $h_{y,i}$ que mantém um módulo i conectado ao módulo $i + 1$ e ao módulo $i - 1$. Sabendo das variáveis influentes, realizamos um balanço das forças atuantes em cada um dos eixos de coordenadas

$$m\ddot{x}_i = f_{R,x,i} + h_{x,i} - h_{x,i-1}, \text{ e}\quad (28a)$$

$$m\ddot{y}_i = f_{R,y,i} + h_{y,i} - h_{y,i-1}. \quad (28b)$$

Em forma matricial para todos os módulos do robô, o balanço de forças pode ser escrito da forma:

$$m\ddot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}_{R,x} + \mathbf{D}^T \mathbf{h}_x, \text{ e} \quad (29a)$$

$$m\ddot{\mathbf{Y}} = \mathbf{f}_{R,y} + \mathbf{D}^T \mathbf{h}_y, \quad (29b)$$

onde $\mathbf{h}_x = [h_{x,1}, \dots, h_{x,N}]^T \in \mathbb{R}^N$ e $\mathbf{h}_y = [h_{y,1}, \dots, h_{y,N}]^T \in \mathbb{R}^N$. Uma outra maneira de se obter informações a respeito das acelerações dos módulos do robô é derivar as equações (9a) e (9b) duas vezes em relação ao tempo:

$$\mathbf{D}\ddot{\mathbf{X}} = l\mathbf{A}(\mathbf{C}_\theta \dot{\theta}^2 + \mathbf{S}_\theta \ddot{\theta}), \quad (30a)$$

$$\mathbf{D}\ddot{\mathbf{Y}} = l\mathbf{A}(\mathbf{S}_\theta \dot{\theta}^2 - \mathbf{C}_\theta \ddot{\theta}). \quad (30b)$$

Para se obter os valores de aceleração do robô referentes ao seu centro de massa total, deve-se derivar a equação (6) duas vezes em relação ao tempo e adicionar os resultados obtidos nas equações (29a) e (29b). Vale reparar que após realizar estas operações, as forças de restrição \mathbf{h}_x e \mathbf{h}_y são eliminadas quando as acelerações dos módulos são somadas. Isto ocorre pois $\mathbf{e}^T \mathbf{D}^T = \mathbf{0}$. Desse modo, a aceleração do robô apodal em termos de seu centro de massa total é descrito por

$$\begin{bmatrix} \ddot{p}_x \\ \ddot{p}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} \mathbf{e}^T \ddot{\mathbf{X}} \\ \mathbf{e}^T \ddot{\mathbf{Y}} \end{bmatrix} = \frac{1}{Nm} \begin{bmatrix} \mathbf{e}^T \mathbf{f}_{R,x} \\ \mathbf{e}^T \mathbf{f}_{R,y} \end{bmatrix} = \frac{1}{Nm} \mathbf{E}^T \mathbf{f}_R. \quad (31)$$

Basicamente esta equação informa é que a aceleração do centro de massa do robô apodal é igual ao somatório das forças externas atuantes no robô dividido pela sua própria massa, como esperado.

De forma semelhante ao que foi feito nas equações (28a) e (28b), pode-se descrever o balanço dos torques em um módulo específico i , como sendo:

$$J\ddot{\theta}_i = u_i - u_{i-1} - l \sin \theta_i (h_{x,i} + h_{x,i-1}) + l \cos \theta_i (h_{y,i} + h_{y,i-1}), \quad (32)$$

onde u_i e u_{i-1} são os torques exercidos pelos módulos $i + 1$ e $i - 1$, respectivamente, em um módulo específico i . Sendo assim, o balanço dos torques na forma matricial para todos os módulos do robô pode ser escrito na forma:

$$J\ddot{\theta} = \mathbf{D}^T \mathbf{u} - l \mathbf{S}_\theta \mathbf{A}^T \mathbf{h}_x + l \mathbf{C}_x \mathbf{A}^T \mathbf{h}_y. \quad (33)$$

Resta então, eliminar as forças de restrição da equação (33). Para fazer isto, deve-se pré-multiplicar as equações (29a) e (29b) por \mathbf{D} e inserir os resultados obtidos nas equações (30a) e (30b). Isto resulta na seguinte solução para os eixos de coordenadas x e y

$$\mathbf{h}_x = (\mathbf{D}\mathbf{D}^T)^{-1} (ml\mathbf{A}(\mathbf{C}_\theta \dot{\theta}^2 + \mathbf{S}_\theta \ddot{\theta}) - \mathbf{D}\mathbf{f}_{R,x}), \quad (34a)$$

$$\mathbf{h}_y = (\mathbf{D}\mathbf{D}^T)^{-1} (ml\mathbf{A}(\mathbf{S}_\theta \dot{\theta}^2 - \mathbf{C}_\theta \ddot{\theta}) - \mathbf{D}\mathbf{f}_{R,y}). \quad (34b)$$

Substituindo os valores encontrados para \mathbf{h}_x e \mathbf{h}_y na equação (33), e isolando os torques relativos $\mathbf{D}^T \mathbf{u}$, obtem-se (35a). Com o intuito de isolar o somatório das forças de atrito da equação (31), multiplicando ambos os lados por Nm , obtem-se (35b).

$$\mathbf{M}_\theta \ddot{\theta} + \mathbf{W} \dot{\theta}^2 - l \mathbf{S}_\theta \mathbf{K} \mathbf{f}_{R,x} + l \mathbf{C}_\theta \mathbf{K} \mathbf{f}_{R,y} = \mathbf{D}^T \mathbf{u}, \quad (35a)$$

$$Nm \ddot{\mathbf{p}} = Nm \begin{bmatrix} \ddot{p}_x \\ \ddot{p}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}^T \mathbf{f}_{R,x} \\ \mathbf{e}^T \mathbf{f}_{R,y} \end{bmatrix} = \mathbf{E}^T \mathbf{f}_R. \quad (35b)$$

A força \mathbf{f}_R apresentada na equação (35b) pode ser tanto a força de atrito seco descrita pela equação (23) quanto a força de atrito viscosa, descrita pela equação (27).

Decompondo as variáveis encontradas na equação (29a):

$$\mathbf{M}_\theta = J\mathbf{I}_N + ml^2 \mathbf{S}_\theta \mathbf{V} \mathbf{S}_\theta + ml^2 \mathbf{C}_\theta \mathbf{V} \mathbf{C}_\theta, \quad (36a)$$

$$\mathbf{W} = ml^2 \mathbf{S}_\theta \mathbf{V} \mathbf{C}_\theta - ml^2 \mathbf{C}_\theta \mathbf{V} \mathbf{S}_\theta, \quad (36b)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}^T(\mathbf{D}\mathbf{D}^T)^{-1}\mathbf{A}, \quad (36c)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{A}^T(\mathbf{D}\mathbf{D}^T)^{-1}\mathbf{D}. \quad (36d)$$

Finalmente, ao introduzir uma variável de estado $\mathbf{x} = [\boldsymbol{\theta}^T, \mathbf{p}^T, \dot{\boldsymbol{\theta}}^T, \dot{\mathbf{p}}^T]^T$, é possível reescrever o modelo do robô apodal de forma compacta no espaço tempo como sendo:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}} \\ \dot{\mathbf{p}} \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (37)$$

onde os elementos que compõe $\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ podem ser encontrados resolvendo as equações (35a) e (35b) para $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ e $\ddot{\mathbf{p}}$, respectivamente.

Ao término da modelagem matemática, é dado início à pesquisa das características passíveis de influenciar o atrito na locomoção de robôs apodais. Utilizando a metodologia proposta, estas características são levantadas para uma posterior fabricação de protótipos, com o intuito de se obter valores experimentais de coeficientes de atrito. A modelagem matemática, em conjunto com os valores experimentais de coeficiente de atrito, tornam possível a realização de simulações computacionais que tem como intuito estimar a influência de cada característica no controle do movimento.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada no projeto para identificação dos parâmetros influentes no atrito, assim como uma pré-seleção do equipamento a ser utilizado na fabricação dos protótipos a serem testados.

A pele dos répteis é complexa e fornece diversos propósitos que não só a proteção. Na sessão 2.1.2, alguns destes propósitos foram citados e é justamente esta multifuncionalidade das serpentes que se almeja alcançar com este trabalho. Com o foco voltado à reprodução do atrito anisotrópico, tido como um fator fundamental para algumas formas de locomoção das serpentes, deu-se início às pesquisas direcionadas ao projeto da carcaça do robô apodal.

Existem alguns estudos sobre a utilização de geometrias determinísticas e texturas com o intuito de reduzir ou controlar o atrito. Em algumas aplicações, estes recursos se mostraram eficientes, apesar de ainda haver uma certa dificuldade em se reproduzir texturas bio inspiradas. Borghi, A. et al (2008) reportou uma redução de 10% no atrito ao utilizar formas circulares em seus trabalhos com chapas de aço. Abdel-Aal, H. et al (2012) concluiu que as micro estruturas das escamas de serpentes *Python regius* está diretamente relacionado ao seu padrão anisotrópico de atrito, assim como a geometria das escamas ventrais. A Figura 17 ilustra os pilares para se obter uma maior eficiência na locomoção do robô apodal a partir da regulagem das superfícies atritantes.

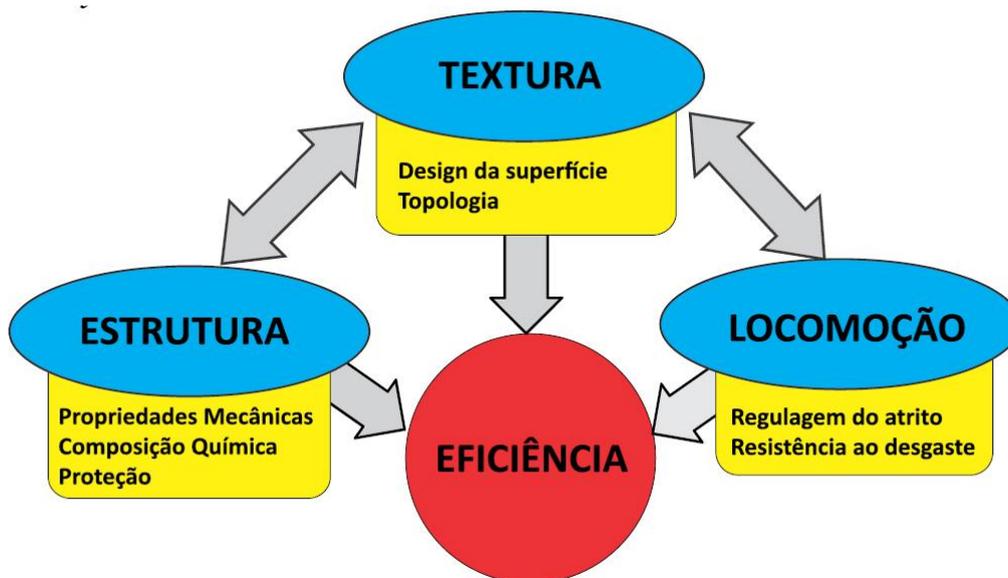


Figura 17 - Esquema de como as propriedades da carcaça do robô apodal devem interagir.

A metodologia utilizada no projeto buscou partir de padrões encontrados na natureza para definir alternativas construtivas viáveis para realizar uma regulagem no atrito das superfícies de um robô apodal. O processo iterativo utilizado no decorrer deste projeto pode ser melhor descrito através do fluxograma ilustrado na Figura 18.

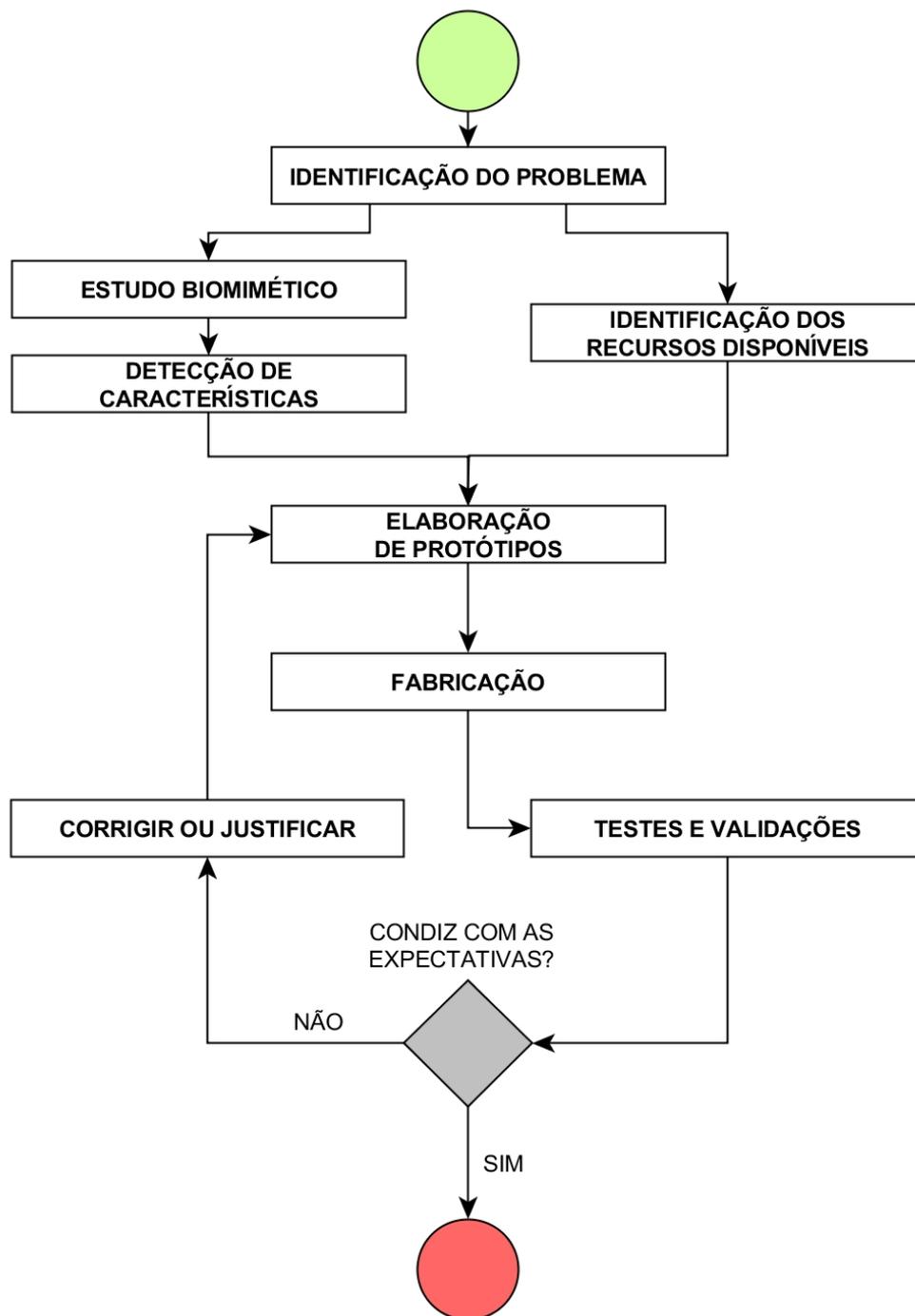


Figura 18 - Fluxograma do processo iterativo utilizado no projeto.

4.1 PROTOTIPAGEM

Para a primeira série de testes com relação à geometria e reprodução de texturas, a prototipagem rápida FDM (Fused Deposition Modeling) foi considerada como a melhor forma de produzir os protótipos, dada sua agilidade, qualidade e variedade de materiais compatíveis. A máquina disponibilizada para o projeto foi a “UP! Mini” (Figura 19) que possui precisão de 0.2 mm e é compatível com alguns materiais termoplásticos como o ABS e o PLA.



Figura 19 - Impressora 3D "UP! Mini" utilizada na fabricação dos protótipos

4.1.1 Plástico ABS

O plástico ABS é um copolímero composto pela combinação de acrilonitrila, butadieno e estireno. O resultado físico deste copolímero é um material termoplástico rígido e leve, com alguma flexibilidade e resistência na absorção de impacto. O ABS pode assumir qualquer forma, por moldagem térmica a partir de 205°C e é insolúvel na água. Além de suas boas propriedades físicas, com a popularização dos métodos de prototipagem rápido, este material vem se tornando cada vez mais barato, possuindo uma excelente relação entre preço e qualidade, o que nos proporciona protótipos econômicos e eficazes. A Tabela 3 traz uma análise de alternativa entre o ABS e sua principal alternativa na prototipagem rápida, o PLA.

Tabela 3 - Análise de alternativa entre os plásticos PLA e ABS

	PLA	ABS
Fórmula molecular	(C ₃ H ₄ O ₂) _n	(C ₈ H ₈ -C ₄ H ₆ -C ₃ H ₃ N) _n
Biodegradável	SIM	NÃO
Temperatura de Fusão	173°C	205°C
Transição Vítea	63°C	105°C
Acabamento de Superfície	BOM	ÓTIMO
Dureza Rockwell	R70 a R90	R105 a R110
Densidade a 203°C	1.25 g/cm ³	1.04 g/cm³
Resistência à tração	57 MPa	48 MPa
Resistência à flexão	55 MPa	76 MPa

Os polímeros de ABS são resistentes a compostos alcalinos, ácidos aquosos, ácidos hidrocloreídricos e fosfórico concentrados, álcoois e óleos animais, vegetais e minerais mas são expandidos por ácido acético glacial, que é o componente ácido do vinagre, tetracloreto de carbono e hidrocarbonetos aromáticos. São atacados pelos ácidos sulfúrico e nítrico concentrados, e também são solúveis em ésteres, cetonas e organoclorado de etileno.

Apesar de ser capaz de manter a integridade física em temperaturas na faixa dos 100°C, o ABS é inflamável quando exposto a altas temperaturas, como as da combustão de madeiras numa fogueira. O material tende a aquecer até se derreter, atingir a fervura e então rebentar em intensas chamas quentes.

A faixa de utilização recomendada deste plástico situa-se em temperaturas entre 25°C negativos e 60°C positivos, levando em consideração que suas características mecânicas são alteradas em função da temperatura. Esta faixa de utilização é estabelecida pelo fato de que a resistência ao impacto não decresce rapidamente em baixas temperaturas e a estabilidade sobre carga térmica é excelente com cargas limitadas.

Tendo conhecimento do material a ser utilizado e o processo de fabricação, é dado início à identificação das características influentes no atrito a serem reproduzidas nos protótipos.

5 SUPERFÍCIES DE ATRITO

Com o foco direcionado na parte externa do robô, é realizado então o levantamento de hipóteses relativas aos fatores que influenciam o padrão de atrito anisotrópico encontrado nas serpentes.

5.1 GEOMETRIAS DETERMINÍSTICAS

A geometria das escamas das serpentes varia de acordo com a espécie e sua região do corpo. Foram escolhidas para análise somente as geometrias referentes às escamas ventrais, localizadas na parte inferior ao corpo da serpente, sendo estas as que possuem maior área de contato com o solo. Como a forma das escamas também varia dependendo da espécie, dois padrões contrastantes foram selecionados. Estes padrões são o curvo, mais comum em serpentes de pequeno a médio porte, e o hexagonal, mais comum em serpentes de grande porte.

5.1.1 Padrão Curvo

A espécie que serviu de inspiração para a captação das geometrias deste padrão (Figura 20) foi a *Naja melanoleuca*. Esta serpente é capaz de escalar árvores, locomover-se em locais estreitos como buracos, atravessar regiões de terreno bastante irregular e, apesar de ser uma espécie terrestre, também é capaz de se locomover na água. Não só versátil, esta espécie também é uma referência por ser bastante ágil em suas ações, conforme indica Liptak, C. (2012).



Figura 20 - Padrão curvo das escamas ventrais da serpente naja

A partir da análise de uma série de imagens e com o auxílio do software CAD SolidWorks 2013, medições das escamas ventrais foram realizadas com o intuito de adquirir uma relação de proporção na forma geométrica das mesmas. Este padrão se mostrou alongado

na direção lateral e com uma leve curvatura que aponta para a direção da cabeça da serpente. Outro fator observado foi que a área das escamas não é uniforme e a proporção entre elas também varia. A partir da medição de 10 escamas diferentes, foi calculada a média aritmética para cada dimensão. Utilizando a largura longitudinal da escama como referência, a Figura 21 ilustra a relação encontrada

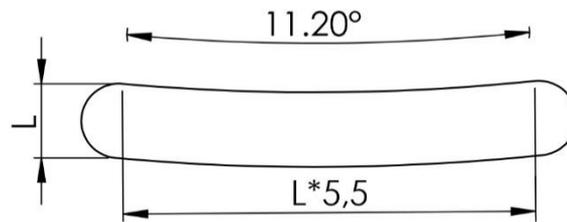


Figura 21 - Proporção dos elementos de escama ventral da serpente *Naja melanoleuca*

5.1.2 Padrão Hexagonal

A Figura 22 ilustra o padrão hexagonal, o mais comum em serpentes pesadas, a espécie escolhida para realizar a análise foi a *Python sebae*: a maior da África e uma das maiores do mundo. Nenhuma das serpentes desta família possui dentes inoculadores de veneno, porém, possuem presas afiadas com o intuito de agarrar sua presa, que é finalizada por constrição. Apostando não na velocidade mas em emboscadas, as serpentes *Python* possuem menos flexibilidade de locomoção mas são capazes de carregar um peso muito maior, considerando que podem ter até 7.5 m de comprimento e alimentam-se de diversos animais incluindo vertebrados de médio porte (Bartlett, P. 2009).

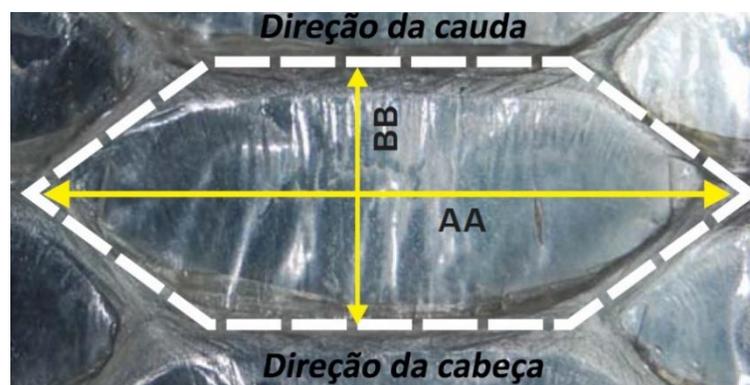


Figura 22 - Padrão hexagonal das escamas ventrais da serpente *Python sebae*

Utilizando a mesma metodologia de medição das escamas com geometria curva, 10 escamas foram analisadas com o intuito de se obter a média aritmética para cada uma das

dimensões que compõe a forma. Notou-se que para este padrão, as escamas possuem alongamento na direção lateral assim como as escamas curvas porém não há curvatura na direção normal à do corpo. Utilizando a largura longitudinal da escala como referência, a Figura 23 ilustra a relação de proporção observada.

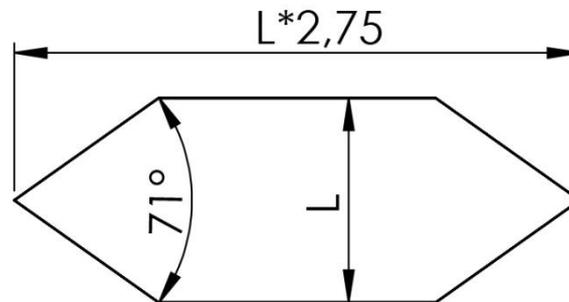


Figura 23 - Proporção dos elementos de escama ventral da serpente Python sebae

5.2 TEXTURA

Menor em escala mas não em importância, a textura das escamas é algo que não deve ser ignorado pois também influencia no atrito anisotrópico das serpentes. As micro estruturas das escamas não possuem tamanho nem forma única. Na Figura 24 é possível observar as escamas de 4 espécies de serpente ampliadas microscopicamente na escala 10 000 x. É notável que nesta escala a distribuição das fibras, independentemente da espécie, é não linear. A proporção e a dimensão das fibras também varia em uma mesma espécie de acordo com sua localização relativa ao corpo. Hazel, J. et al (1999) ressalta que a inclinação da ponta das fibras é mais íngreme na região posterior (próxima à cauda) e mais suave nas regiões próximas à cabeça. Ele também propôs que a textura assimétrica das escamas, em conjunto com a elasticidade das fibras eram responsáveis pelo atrito anisotrópico observado nas serpentes.

A análise metrológica das escamas ventrais, tanto em nível macro quanto micro, indicam que estas não possuem dimensões uniformes. A densidade de fibras e o espaçamento entre fileiras (Figura 25) variam dependendo da sua localização referente ao corpo. Esta diferença geométrica afeta as propriedades da superfície de contato da serpente, que como consequência, resulta em diferentes forças de tração derivadas do atrito.

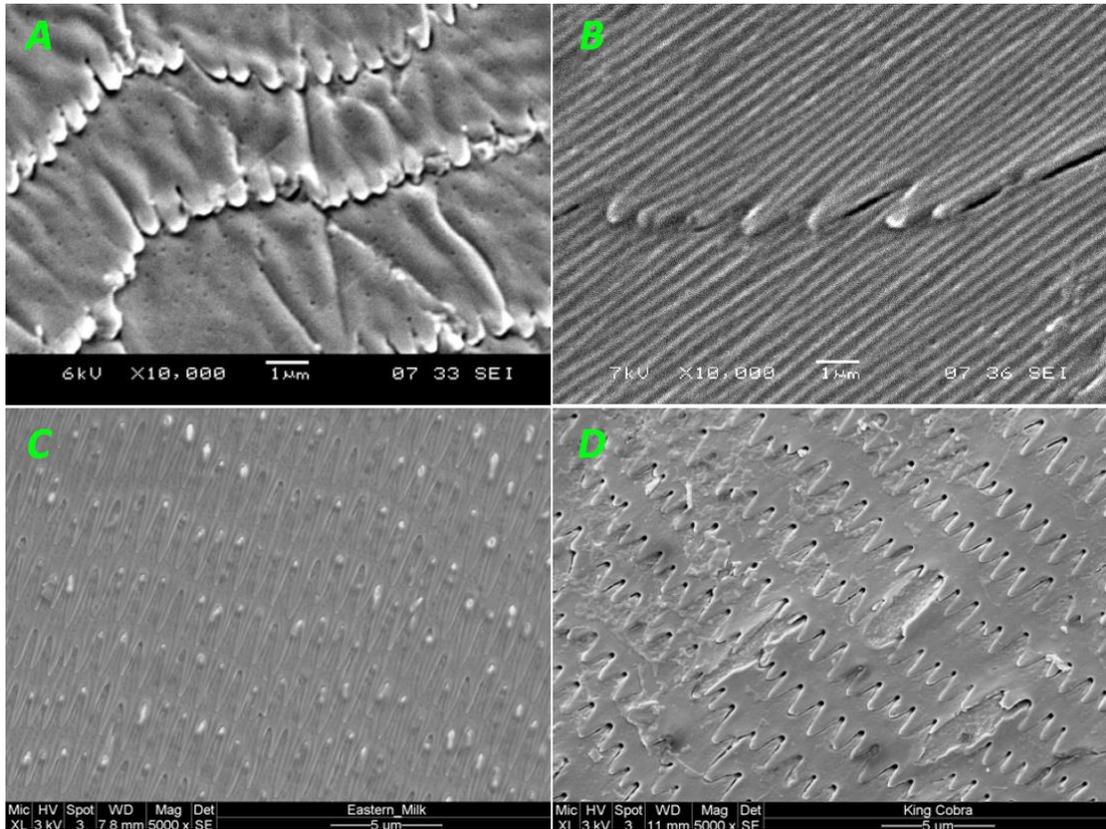


Figura 24 - Detalhamento de micro estruturas encontradas nas escamas ventrais de algumas espécies de serpentes. A) Píton-Real (*Python regius*), B) Jiboia (*Boa constrictor*), C) Cobra do leite (*Lampropeltis triangulum*), D) Cobra-Real (*Ophiophagus hannah*). [Nosonovsky, M. & Bhushan, B. 2012]

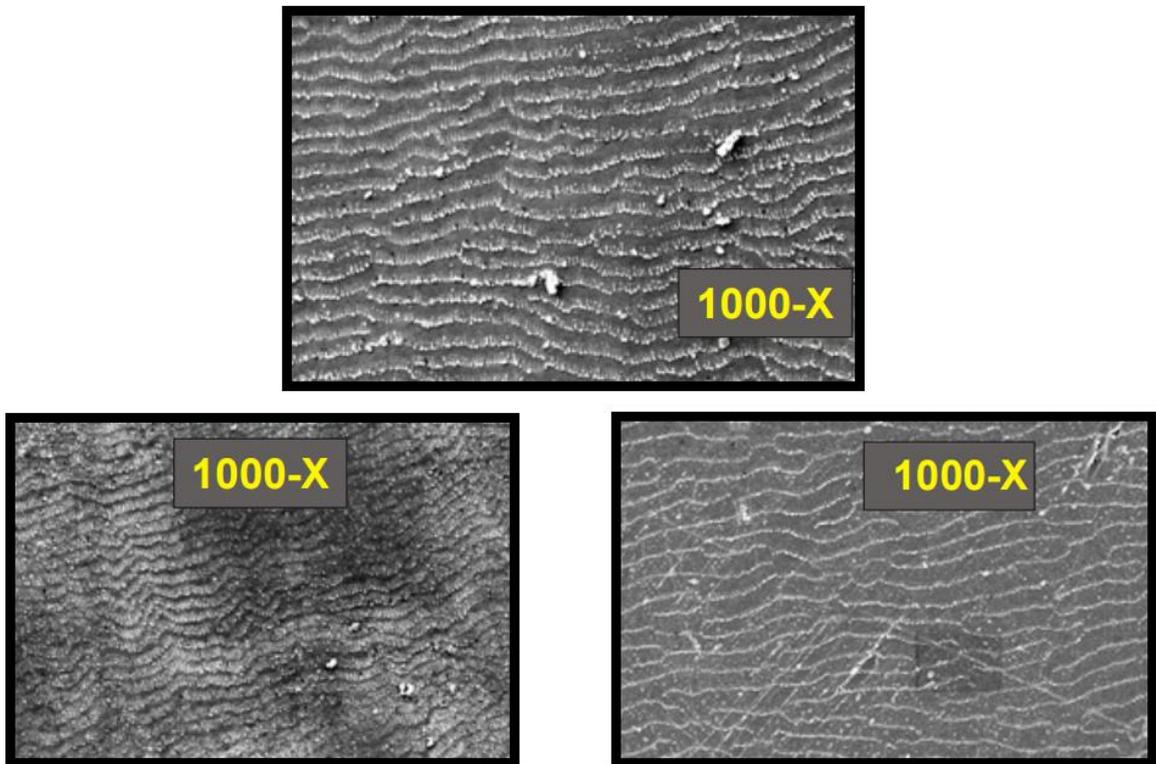


Figura 25 - Fileiras de fibras encontradas nas escamas ventrais de serpentes da família Python. [Abdel-Aal, H. 2012]

Apesar de estas fibras possuírem dimensão muito pequena, ao analisar o padrão formado pelo conjunto de fibras em uma escala menos ampliada (Figura 26), é possível encontrar uma forma mais fácil de ser reproduzida com o equipamento de prototipagem proposto. Levando em consideração que a prototipagem rápida FDM é o resultado da adição de material por camadas, a textura causada pelas fileiras de fibras foi reproduzida ao inclinar o ângulo de impressão do protótipo. A fim de se obter esta angulação, alguns parâmetros médios de proporção das escamas das serpentes foram considerados, conforme Figura 26

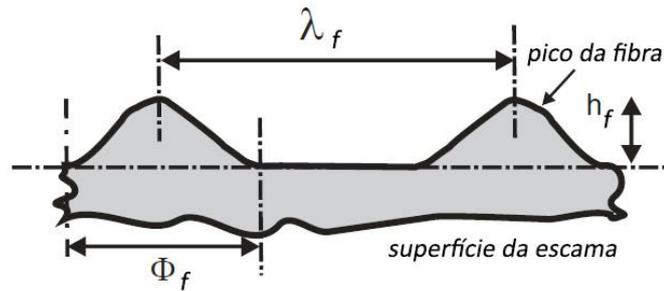


Figura 26 - Geometrias primitivas da superfície das escamas ventrais de uma serpente Python [Abdel-Aal, H. 2012].

Sendo:

λ_f : Espaçamento entre picos de fibra

ϕ_f : Comprimento da base da fibra

h_f : Altura de pico da fibra

Utilizando a altura entre camadas de impressão da máquina “UP! Mini” como referência para a altura de pico da fibra, a angulação média adquirida para a impressão 3D foi de 15° . A Figura 27 ilustra o que se espera ao final da prototipagem de uma peça de geometria simples com o ângulo de impressão proposto.

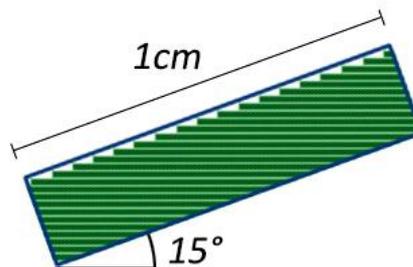


Figura 27 - Resultado esperado da impressão de uma peça de geometria simples em uma máquina de prototipagem rápida com precisão no eixo Z de 0.2 mm

6 MEDIÇÃO DO ATRITO

Este capítulo apresenta instruções gerais sobre o método de medição dos coeficientes de atrito dos protótipos criados bem como um levantamento de dados experimentais para posterior discussão no capítulo de conclusão.

As forças de atrito são muito presentes na vida cotidiana. Provocam desgaste nas peças móveis de máquinas e são responsáveis pelo aumento de energia interna das mesmas, devido ao aquecimento causado pela fricção.

Por outro lado, sem atrito não haveria transmissão do movimento. Isto é, não seríamos capazes de caminhar, as serpentes não seriam capazes de se locomover, não poderíamos escrever e uma leve corrente de ar seria capaz de fazer com que as coisas se movessem, e nunca parassem.

É notável que as forças de atrito tem grande importância em todos os processos que ocorrem na Natureza. Estas forças originam-se nas áreas de contato entre dois corpos. A origem da força de atrito é de natureza eletromagnética, e deve-se à interação entre nuvens eletrônicas dos átomos localizados nas zonas de contato entre os corpos. Mesmo as superfícies aparentemente planas de materiais, não o são de fato. A superfície microscópica de um objeto é cheia de picos e vales que podem atingir milhares de raios atômicos de comprimento.

Quando duas superfícies de sólidos distintos são postas em contato, apenas uma pequena superfície de contato entre eles ocorre de fato. Nestas regiões de contato os picos se aderem uns aos outros em virtude das forças de coesão intermoleculares. Quando estes materiais são empurrados, um em relação ao outro, estes inúmeros picos entram em ruptura, dando origem a outros à medida que novos contatos vão sendo realizados.

6.1 MODELOS DE ATRITO

6.1.1 Modelos Simplificados

Os modelos estáticos são uma representação matemática simples do comportamento do atrito. Eles não representam o atrito como um processo complexo ideal, representam apenas alguns de seus sub processos. A Figura 28 ilustra uma esquematização da força de atrito F atuando sob um corpo de massa M sujeito a uma velocidade v .

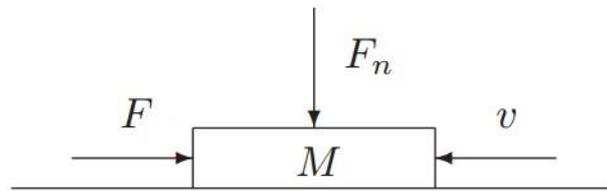


Figura 28 - Esquema representativo da força de atrito F atuando sob um corpo de massa M se movendo em uma superfície plana. [Geffen, V. 2009]

F_n é a força normal, que possui direção perpendicular à superfície de contato.

Atrito Seco (Coulomb)

A forma mais conhecida de modelagem do atrito é utilizando a formulação proposta por Coulomb. Apesar de simplificar bastante o fenômeno do atrito, este modelo é comumente utilizado em aplicações de engenharia, onde os efeitos dinâmicos não são levados em consideração. Apesar de ser uma simplificação, o atrito seco é um dos parâmetros utilizados em modelos de atrito complexos (Péter, K. 2014). A força de atrito seco F_c é uma força de magnitude constante, que atua na direção oposta à do movimento. A Figura 29 Ilustra o comportamento desta força em relação à velocidade do objeto.

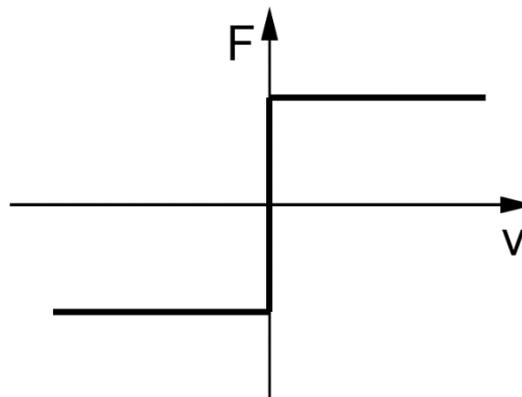


Figura 29 - Comportamento do atrito seco

Pode-se descrever a força de atrito seca na forma:

$$F_c = \mu F_N . \tag{38}$$

Atrito Viscoso

Durante o século XIX, a teoria hidrodinâmica foi desenvolvida, trazendo considerações relativas ao atrito causado por fluidos viscosos, como visto em O. Reynolds (1886). O modelo viscoso, apresentado por Reynolds, relaciona a força de atrito como sendo proporcional à velocidade de deslocamento do corpo. A Figura 30 Ilustra o comportamento desta força em relação à velocidade de um objeto.

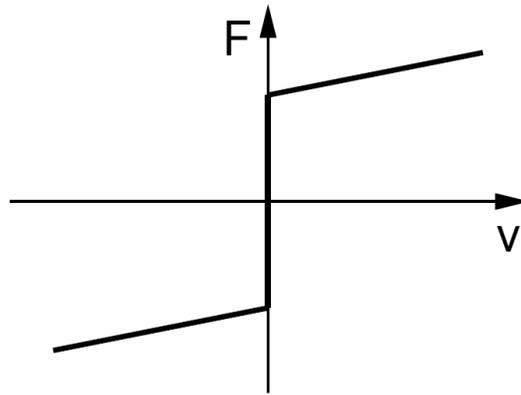


Figura 30 - Comportamento do atrito viscoso

Pode-se descrever a força de atrito viscosa na forma:

$$F_v = cv, \quad (39)$$

onde c é o coeficiente de atrito viscoso de um objeto e v , sua velocidade.

Efeito Stribeck

A maioria das superfícies de contato são lubrificadas. Em superfícies de contato lubrificadas, o atrito decresce com o aumento da velocidade até que se alcance uma situação de as superfícies estejam completamente separadas por uma camada de fluido, onde o atrito passa a ser diretamente proporcional ao aumento da velocidade (Andersson, S. et al 2007).

A curva de Stribeck representa um modelo mais elaborado do atrito em função da velocidade. Esta abordagem relaciona a força de atrito total como sendo uma combinação do modelo de atrito seco e viscoso (Péter, K. 2014). A Figura 31 Ilustra o comportamento desta força em relação à velocidade de um objeto.

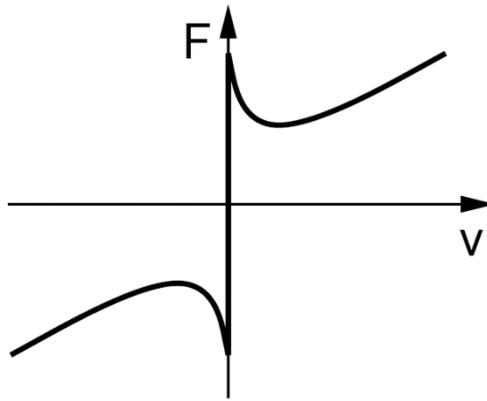


Figura 31 - Comportamento do atrito, como proposto pelo modelo de Stribeck

6.1.2 Modelos Complexos

Os modelos complexos são baseados nos modelos simples porém com algumas considerações adicionais que melhor descrevem o comportamento dinâmico do atrito. Mesmo com o auxílio destes modelos, os estudos em topologia ainda estão longe de compreender de forma completa os efeitos do atrito (Péter, K. 2014). Sendo assim, a maior parte destes modelos foi elaborada de modo empírico.

Modelo Karnopp

A maior desvantagem de se utilizar os modelos simples é o fato de não ser possível detectar o atrito, em simulações, quando a velocidade é nula. Com o intuito de resolver este problema, Karnopp partiu para uma abordagem matemática, definindo um intervalo de velocidade zero. Para velocidades dentro deste intervalo, a força de atrito é representado como uma versão saturada da força externa aplicada ao corpo (Olsson, H. et al 1998). Assim que o corpo passa a se mover com velocidade superior a deste intervalo, a velocidade volta a fazer parte da equação do atrito. Este modelo ainda é instável mas é citado de forma ampla em estudos de controle (França, T. 2016)

Modelo Dahl

Este modelo é frequentemente utilizado em engenharia de controle. Dahl baseou seu modelo de atrito no fato de que a força de atrito é função apenas do deslocamento (Anderson, S. 2007). Para objetos submetidos a pequenos deslocamentos, ele observou que os objetos tendem a retornar à sua posição original. Dahl comparou este fenômeno com as constantes elásticas do material. Para deslocamentos maiores, o comportamento destes objetos passa a ser análogo ao de uma deformação plástica, resultando em um deslocamento definitivo (Geffen, V. 2009).

6.2 MÉTODO DE MEDIÇÃO DO ATRITO

Para realizar a medição do atrito, o modelo de atrito seco foi escolhido. Esta escolha se justifica pelo fato deste ser o primeiro levantamento experimental inicial sobre o assunto. O coeficiente de atrito seco é um dos mais simples de ser determinado de forma experimental, por levar em consideração uma menor quantidade de variáveis.

Com o intuito de se adquirir valores de coeficiente de atrito seco, o plano inclinado foi a solução escolhida. Esta metodologia consiste em utilizar uma superfície plana e oblíqua com angulação menor que 90° em relação ao plano horizontal. Ela foi empregada por Galileu Galilei com o intuito de compensar o efeito da gravidade, ou seja, desacelerar a queda de um objeto que se encontra sob o plano inclinado a medida em que o plano vai sendo gradualmente aumentado. O cálculo da desaceleração nesta superfície é dado por $g \sin \theta$, onde θ representa o ângulo de inclinação do plano utilizado.

O Plano Inclinado Aragão VII foi utilizado para os experimentos, disponibilizado pelo Instituto de Física da UnB. Este instrumento de medição, apresentado na Figura 32, é composto por um sistema de polias responsáveis por erguer uma das extremidades do plano da forma mais suave possível, evitando perturbações desnecessárias que possam atrapalhar as medidas. O Plano Inclinado Completo Aragão VII possui escala de 1° e, por ser um instrumento de medição analógico, possui incerteza de 0.5° . Este tipo de instrumentação é adequado para realizar medições do coeficiente de atrito estático de um corpo.

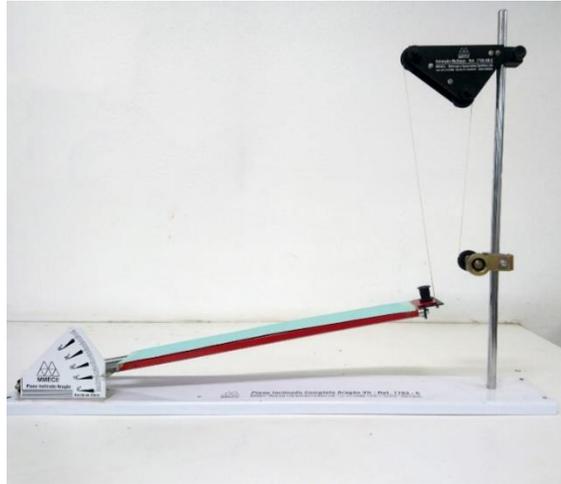


Figura 32 - Plano Inclinado Completo Aragão VII

Como observado na Equação 38, existe uma relação de linearidade entre a força normal e a força de atrito. Quando o plano se encontra em repouso, com ângulo igual a 0, a força da gravidade influencia apenas no eixo Y, relativo ao plano. A medida em que esta angulação vai aumentando, a força peso da placa começa a influenciar também no eixo X, relativo ao plano, como ilustrado na Figura 33.

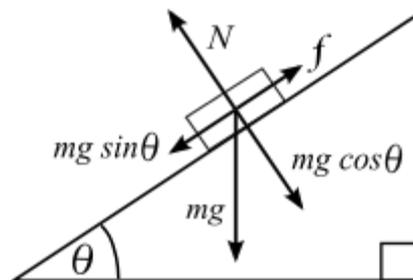


Figura 33 - Diagrama de Corpo Livre de um corpo sob plano inclinado

Compreendendo a distribuição das forças, partimos para a identificação de cada componente:

$$|F_x| = mg \operatorname{sen} \theta , \quad (40a)$$

$$|F_y| = mg \operatorname{cos} \theta . \quad (40b)$$

Para que o sistema se mantenha em equilíbrio estático, o somatório das forças em cada eixo deve ser nulo. Encontra-se então os componentes N e F_{at} :

$$|F_{at}| = |F_x| = mg \operatorname{sen} \theta , \quad (41)$$

$$|N| = |F_y| = mg \operatorname{cos} \theta . \quad (42)$$

Partindo da formulação encontrada na equação (38), igualando com (41) e substituindo o valor da componente normal deduzida em (42), obtem-se:

$$\mu_e = \frac{mg \operatorname{sen} \theta}{mg \operatorname{cos} \theta} = \tan \theta . \quad (43)$$

Torna-se evidente a relação direta entre o coeficiente estático do corpo a ser medido e a angulação máxima obtida pelo plano, antes que este entre em movimento devido à força exercida pela gravidade.

Para cada placa a ser testada, foram realizadas 10 medições, zerando a angulação do plano e aumentando-a gradativamente até que a placa entrasse em movimento. Após a realização destas medidas, foi calculada a média aritmética dos 10 valores encontrados de modo a se obter um ângulo médio. A partir do ângulo médio, os valores de cada coeficiente de atrito foram encontrados, a fim de se obter um parâmetro comparativo entre as placas.

6.3 INFLUÊNCIA DAS GEOMETRIAS DETERMINÍSTICAS

Com o intuito de se obter dados concisos que indiquem o interesse, ou não, de se utilizar as geometrias descritas durante a seção (5.1) no exterior da carcaça de um robô apodal, foram fabricadas placas em ABS com dimensões semelhantes. De tal modo, foi possível obter uma mesma área de contato independentemente da geometria utilizada. As dimensões de cada uma das placas podem ser encontradas no Anexo I. As Figuras 34 e 35 são o resultado da prototipagem placa com perfil hexagonal e da placa com perfil curvo, respectivamente.

Espera-se deste experimento obter uma relação de influência entre as geometrias determinísticas e o padrão de coeficiente de atrito anisotrópico observado na escama das serpentes. De tal modo, foram realizadas medidas em dois sentidos de deslizamento da placa para realizar um levantamento, em porcentagem, da diferença do coeficiente de atrito em cada direção ou sentido de movimento.

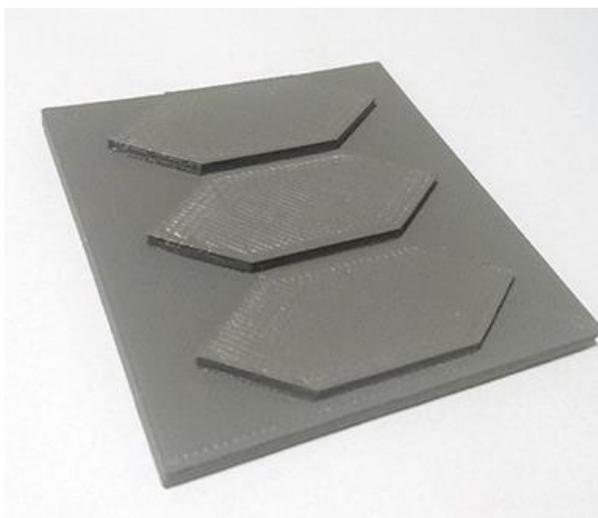


Figura 34 - Resultado do protótipo de padrão hexagonal



Figura 35 - Resultado do protótipo de padrão curvo

6.3.1 Padrão Hexagonal Sem Textura

Para o padrão hexagonal, foram realizadas medidas com a placa na direção normal e tangente, sem variação no sentido, conforme indica a Figura 36. Esta escolha se deu pelo fato de que para uma direção determinada, a face é a mesma independentemente da direção, tanto para a normal quanto para a tangente.

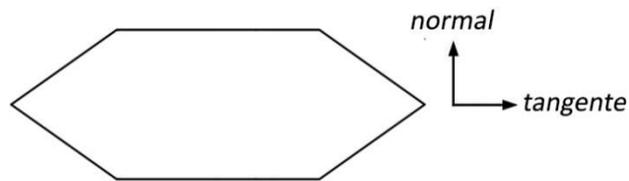


Figura 36 - Direções de deslizamento da placa com padrão hexagonal

Iniciando pela direção tangente, os valores encontrados em cada medição podem ser visualizados nos gráficos a seguir

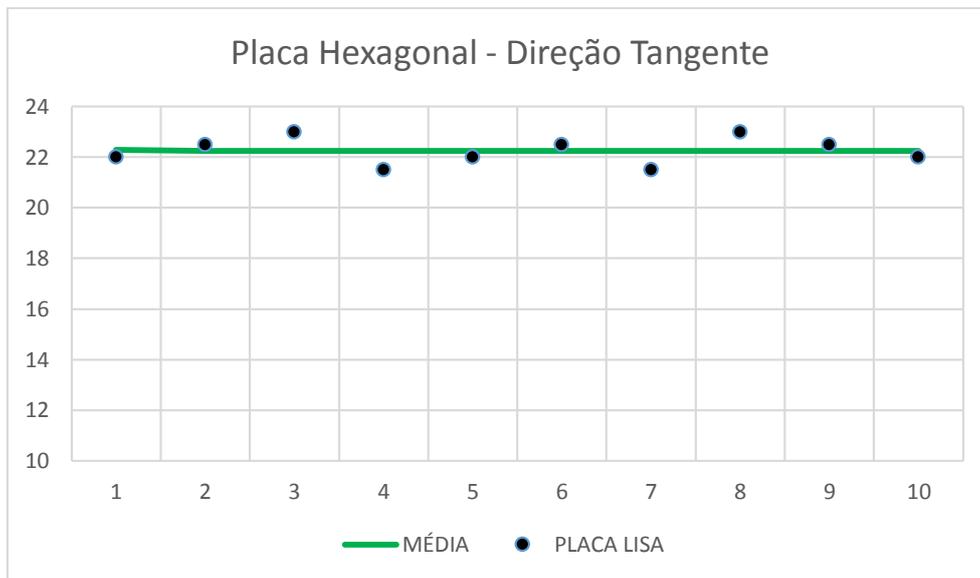


Figura 37 - Dados experimentais da placa com padrão hexagonal sem textura, na direção tangente

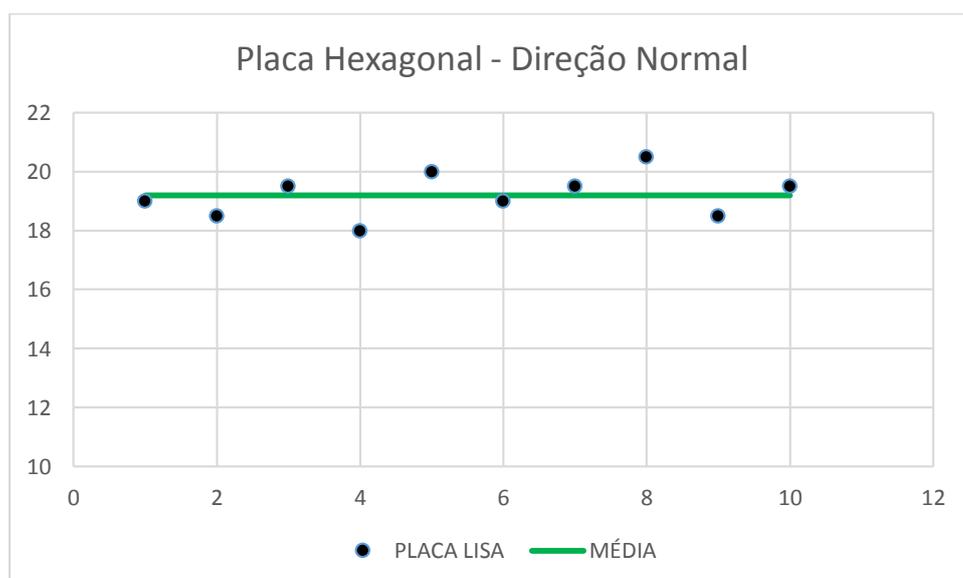


Figura 38 - Dados experimentais da placa com padrão hexagonal sem textura, na direção normal

Utilizando os valores médios como referência, foi calculado o valor dos respectivos coeficientes de atrito estático, conforme indicado pela Tabela 4.

Tabela 4 - Resumo do experimento com placas de padrão hexagonal sem textura

	Direção Tangente	Direção Normal
θ_{medio}	22.3°	19.2°
μ_e	0.410	0.348

Para este experimento, foi observado que a diferença entre os valores de coeficiente de atrito para as determinadas direções é:

$$\Delta\mu_e^{percentual} = \frac{\mu_e^{Tangente}}{\mu_e^{Normal}} - 1 = 17.77\% . \quad (44)$$

6.3.2 Padrão Curvo Sem Textura

Para as placas de padrão curvo, foram realizadas medidas na direção normal, em ambos os sentidos, e tangente, conforme indica a Figura 39. Esta escolha se deu pelo fato de que na direção normal, a face da placa varia dependendo do sentido enquanto no sentido tangente não há variação da geometria de face.

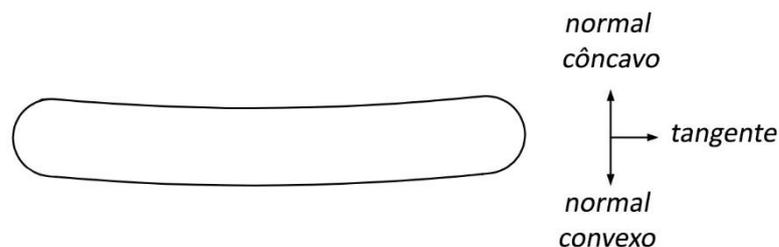


Figura 39 - Direções de deslizamento da placa com padrão curvo

Iniciando pela direção tangente e em seguida repetindo o experimento para a direção normal e seus respectivos sentidos, os valores encontrados em cada medição podem ser visualizados nos gráficos a seguir

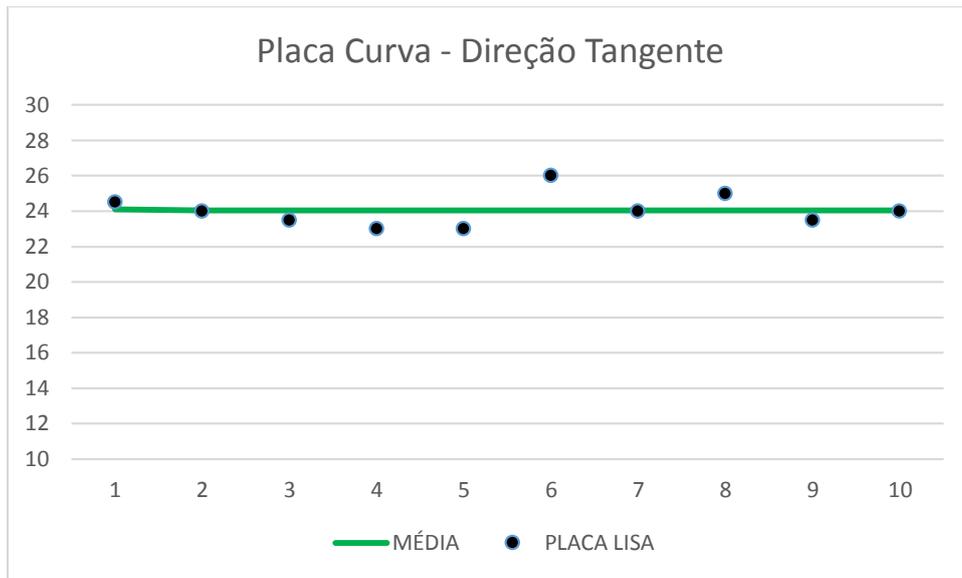


Figura 40 - Dados experimentais da placa com padrão curvo sem textura, na direção tangente

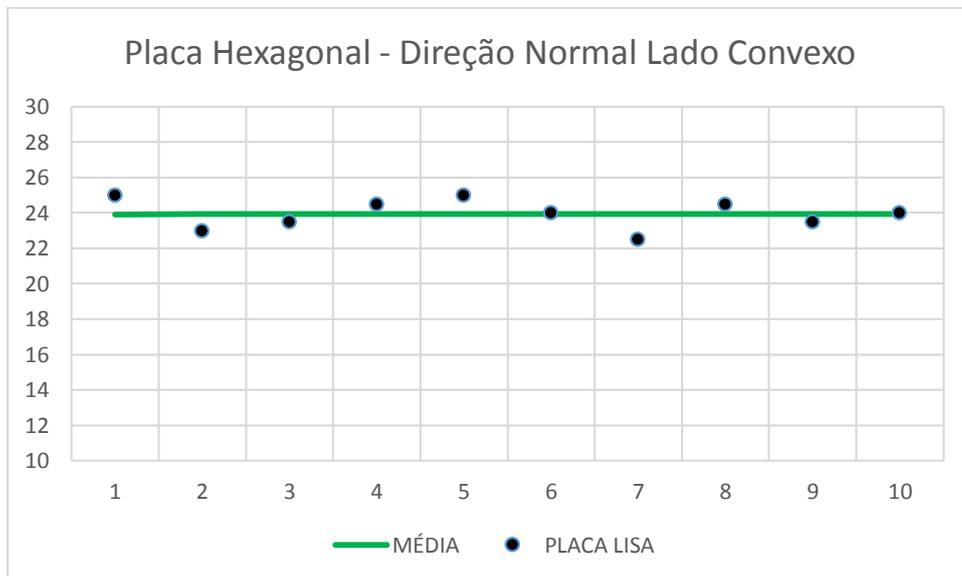


Figura 41 - Dados experimentais da placa com padrão curvo sem textura, na direção normal e face frontal convexa

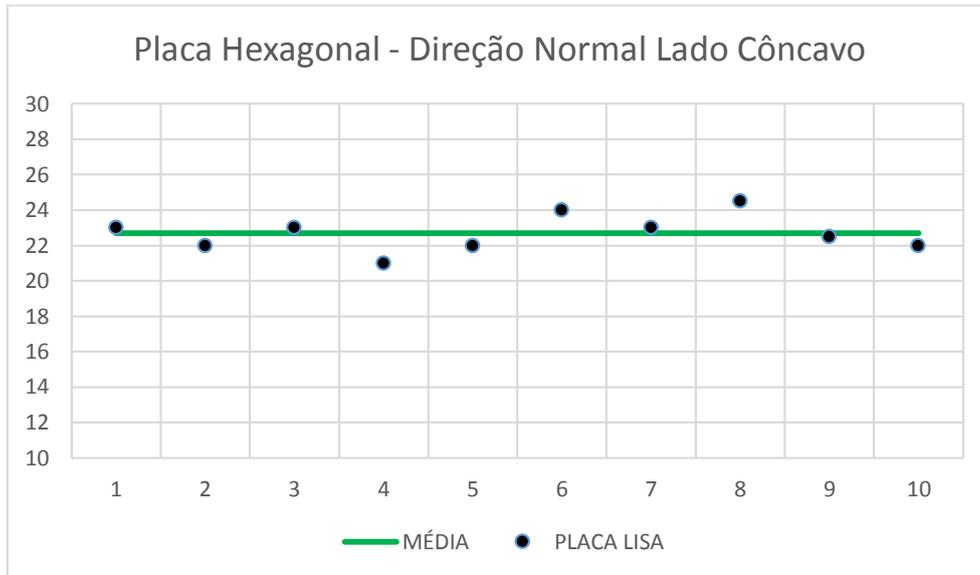


Figura 42 - Dados experimentais da placa com padrão curvo sem textura, na direção normal e face frontal côncava

Utilizando os valores médios como referência, foi calculado o valor dos respectivos coeficientes de atrito estático, conforme indicado pela Tabela 5.

Tabela 5 - Resumo do experimento com placas de padrão curvo sem textura

	Direção Tangente	Direção Normal Convexo	Direção Normal Côncavo
θ_{medio}	24.1°	23.9°	22.7°
μ_e	0.447	0.443	0.418

Para este experimento, por terem sido realizadas medições em ambos os sentidos de uma mesma direção, foi realizado um comparativo entre o coeficiente de atrito estático na direção tangente e o menor coeficiente de atrito estático da direção normal assim como um comparativo resultante da troca de sentido nesta direção.

$$\Delta\mu_{e\text{Direção}}^{\text{Percentual}} = \frac{\mu_e^{\text{Tangente}}}{\mu_e^{\text{Normal Côncavo}}} - 1 = 6.94\% \quad (45a)$$

$$\Delta\mu_{e\text{Sentido}}^{\text{Percentual}} = \frac{\mu_e^{\text{Normal Convexo}}}{\mu_e^{\text{Normal Côncavo}}} - 1 = 5.98\% \quad (45b)$$

6.4 INFLUÊNCIA DA TEXTURA REPRODUZIDA

Não foram encontrados estudos que mostrem como a reprodução de uma textura, originalmente na escala dos nanômetros, na escala milimétrica pode influenciar o comportamento. Principalmente pelo fato de ser algo feito a partir de máquinas de prototipagem rápida que tornaram-se economicamente viáveis a pouco tempo. A Figura 43 ilustra o resultado da textura reproduzida.

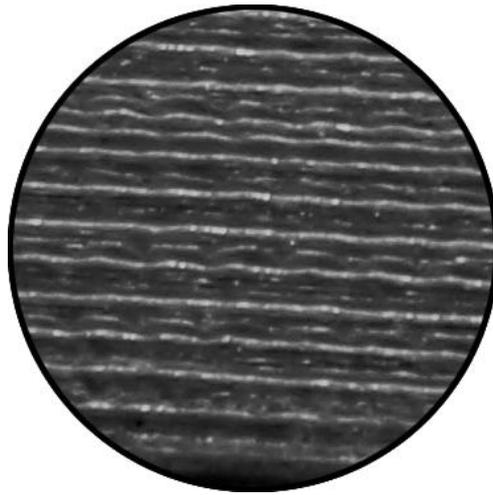


Figura 43 - Resultado da textura reproduzida com o auxílio de impressora 3D

Com o intuito de se obter dados concisos que indiquem o interesse, ou não, de se utilizar esta textura, resultante da alteração do ângulo de impressão da placa, foi utilizada a mesma metodologia das placas sem textura. Minimizando possíveis variáveis que interfiram nos dados, como a dimensão das placas, as mesmas geometrias foram utilizadas, alterando apenas a textura superficial das mesmas.

Espera-se deste experimento obter uma relação de influência entre a textura aplicada nas geometrias determinísticas e o padrão de coeficiente de atrito anisotrópico desejado para o robô apodal. De tal modo, foram realizadas medidas em três sentidos de deslizamento da placa para realizar um levantamento, em porcentagem, da diferença do coeficiente de atrito em cada direção ou sentido.

6.4.1 Padrão Hexagonal Com Textura

Para o padrão hexagonal, foram realizadas medidas com a placa na direção normal e tangente, sem variação no sentido, conforme indica a Figura 36. Esta escolha se deu pelo fato

de que para uma direção determinada, a face é a mesma independentemente da direção, tanto para a normal quanto para a tangente.

Iniciando pela direção tangente, os valores encontrados em cada medição podem ser visualizados nos gráficos a seguir

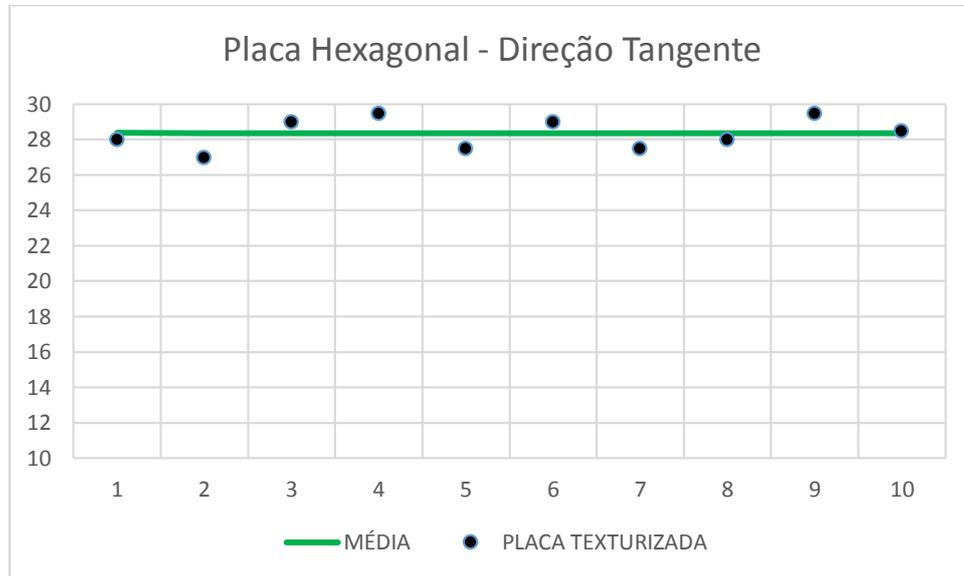


Figura 44 - Dados experimentais da placa com padrão hexagonal com textura, na direção tangente

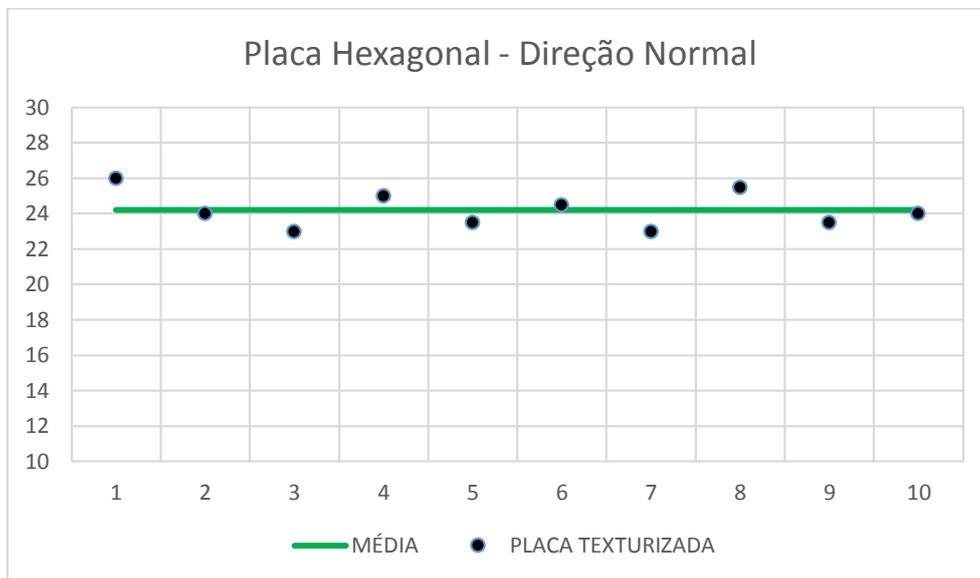


Figura 45 - Dados experimentais da placa com padrão hexagonal com textura, na direção normal

Utilizando os valores médios como referência, foi calculado o valor dos respectivos coeficientes de atrito estático, conforme indicado pela Tabela 6.

Tabela 6 - Resumo do experimento com placas de padrão hexagonal com textura

	Direção Normal	Direção Tangente
θ_{medio}	28.4°	24.2°
μ_e	0.541	0.449

Para este experimento, foi observado que a diferença entre os valores de coeficiente de atrito para as determinadas direções é

$$\Delta\mu_e^{percentual} = \frac{\mu_e^{Tangente}}{\mu_e^{Normal}} - 1 = 20.31\% \quad (46)$$

6.4.2 Padrão Curvo Com Textura

Para as placas de padrão curvo, foram realizadas medidas na direção normal, em ambos os sentidos, e tangente, conforme indica a Figura 39. Esta escolha se deu pelo fato de que na direção normal, a face da placa varia dependendo do sentido enquanto no sentido tangente não há variação da geometria de face.

Iniciando pela direção tangente e em seguida repetindo o experimento para a direção normal e seus respectivos sentidos, os valores encontrados em cada medição podem ser visualizados nos gráficos a seguir

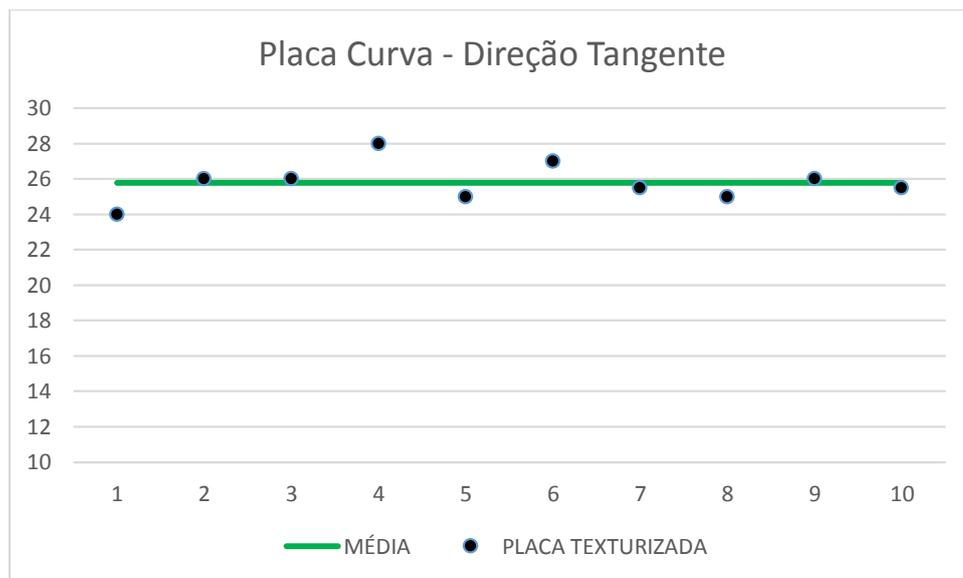


Figura 46 - Dados experimentais da placa com padrão curvo com textura, na direção tangente

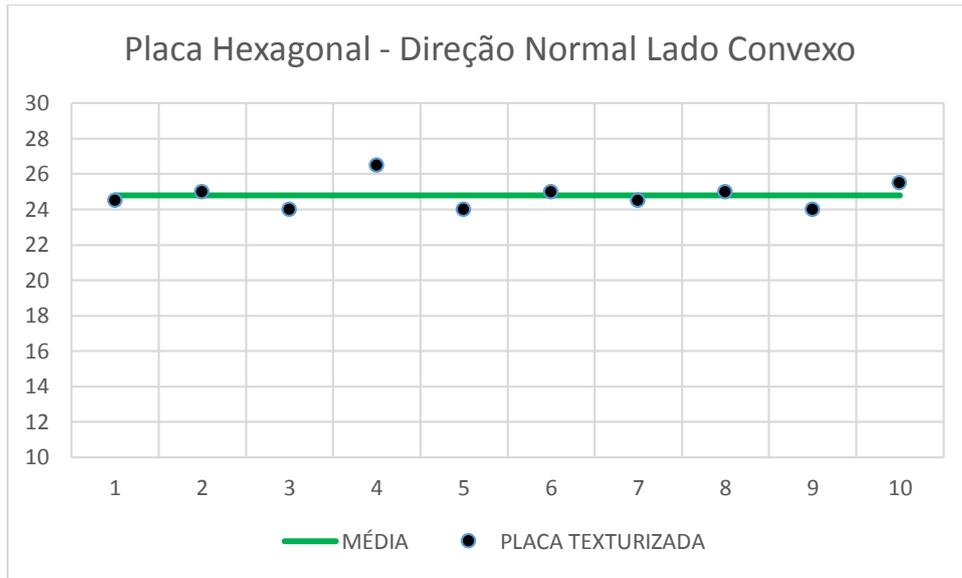


Figura 47 - Dados experimentais da placa com padrão curvo com textura, na direção normal e face frontal convexa

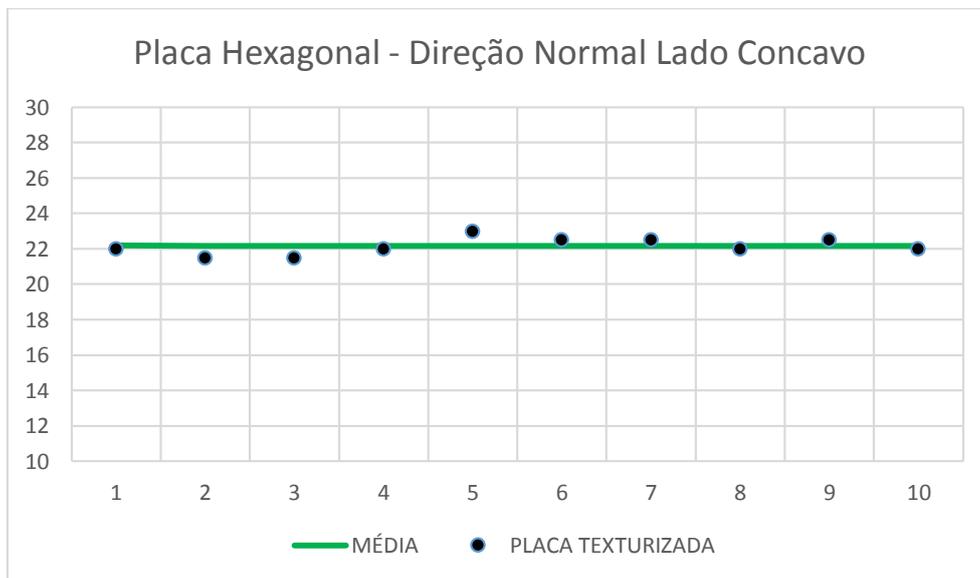


Figura 48 - Dados experimentais da placa com padrão curvo com textura, na direção normal e face frontal côncava

Utilizando os valores médios como referência, foi calculado o valor dos respectivos coeficientes de atrito estático, conforme indicado pela Tabela 7.

Tabela 7 - Resumo do experimento com placas de padrão curvo com textura

	Direção Tangente	Direção Normal Convexo	Direção Normal Côncavo
θ_{medio}	25.8°	24.8°	22.2°
μ_e	0.483	0.462	0.408

Para este experimento, por terem sido realizadas medições em ambos os sentidos de uma mesma direção, foi realizado um comparativo entre o coeficiente de atrito estático na direção tangente e o menor coeficiente de atrito estático da direção normal assim como um comparativo resultante da troca de sentido nesta direção.

$$\Delta\mu_{e\text{Direção}}^{\text{Percentual}} = \frac{\mu_e^{\text{Tangente}}}{\mu_e^{\text{Normal Côncavo}}} - 1 = 18.46\% \quad (47a)$$

$$\Delta\mu_{e\text{Sentido}}^{\text{Percentual}} = \frac{\mu_e^{\text{Normal Convexo}}}{\mu_e^{\text{Normal Côncavo}}} - 1 = 13.23\% \quad (47b)$$

7 CONCLUSÃO

Este último capítulo visa apresentar uma discussão a respeito dos resultados obtidos no Cap. 6 assim como relacionar as condições favoráveis e desfavoráveis ao robô apodal ao se utilizar dos padrões testados em sua estrutura.

Após a realização dos experimentos, torna-se evidente que tanto as geometrias determinísticas quanto a textura reproduzida contribuem para que a estrutura adquira propriedades de atrito anisotrópico. Embora seja de conhecimento do autor que outros fatores também influenciam o atrito da escama das serpentes como a humidade ou temperatura das mesmas, a identificação de parâmetros que possam ajudar a projetar a estrutura de um robô bio-inspirado é um grande avanço na compreensão e controle da movimentação de robôs apodais.

Durante os experimentos com placas sem textura, um primeiro padrão foi obtido. Em questão de diferença entre coeficiente de atrito estático na direção normal e tangente, a placa com padrão hexagonal apresentou melhores resultados, com uma diferença de 17.77% enquanto a placa com padrão curvo apresentou uma diferença de 6.94%. É interessante observar que além de apresentar um padrão de atrito anisotrópico mais nítido, a placa com perfil hexagonal também apresentou menores coeficientes de atrito em ambas as direções, sendo um reforço positivo para a estrutura do robô apodal. Isto se dá pelo fato de que quanto menor a força de resistência ao movimento, menor o gasto energético para mover o robô sob a superfície atritante.

As vantagens resultantes da utilização do perfil hexagonal sem atrito na estrutura do robô favorecem a movimentação serpentina do mesmo. Além de utilizar obstáculos para se impulsionar, ondulando o corpo de forma alternada para um lado e para o outro, as serpentes dependem do atrito anisotrópico para se locomover em superfícies relativamente lisas. De tal modo, dentre as geometrias testadas sem textura, o perfil hexagonal é o que apresenta melhores condições de reproduzir tal movimento.

A placa de padrão curvo sem textura apresenta também uma primeira relação entre diferentes coeficientes de atrito em uma mesma direção. Apresentando diferença dependendo do movimento da placa estar orientado no sentido côncavo ou convexo da mesma, este padrão já oferece condições mínimas para que o robô seja capaz de reproduzir a movimentação retilínea realizada pelas serpentes. Como uma das principais aplicações dos robôs modulares é a

locomoção em locais de difícil acesso, a possibilidade de utilização de mais uma forma de movimento é sempre uma vantagem.

Um fator curioso observado durante este experimento é que o coeficiente de atrito no sentido côncavo foi menor que no sentido convexo, diferentemente do padrão observado na natureza. De qualquer modo, o intuito desta pesquisa é adquirir condições que facilitem a locomoção do robô apodal, sem que haja a necessidade de um vínculo direto entre os padrões de sua estrutura e os padrões encontrados na natureza.

Ao realizar a segunda bateria de testes, com placas texturizadas, diferentes resultados foram obtidos. Assim como no caso das placas sem textura, o padrão hexagonal foi o que proporcionou maior diferença entre o coeficiente de atrito estático na direção normal e na direção tangente, apresentando uma diferença de 20.31%. Por outro lado, a textura fez com que os coeficientes de atrito também aumentassem de forma significativa. Como resultado disto, o robô tende a gastar mais energia para se locomover. O acréscimo do coeficiente de atrito no sentido normal foi de 29%, o que não compensa o pequeno acréscimo de diferença relativa à direção.

Apesar das desvantagens de se utilizar textura na placa com padrão hexagonal, o acréscimo no coeficiente de atrito não é de todo mal. Assim como visto na Figura 10, o movimento sinuoso lateral faz bom proveito de altos valores de coeficiente de atrito na direção transversal. Com estas condições, a texturização neste padrão favorece a locomoção do robô, apesar de ser de aplicação bem específica.

Já a placa com padrão curvo e com textura, obteve resultados bem diferentes dos medidos anteriormente, no caso onde não havia textura. Alcançando uma diferença de 18.46% entre coeficientes de atrito relativos à direção e uma diferença de 13.23% entre coeficientes de atrito relativos ao sentido. De todas as placas testadas, esta foi a que melhor favorece a locomoção dos robôs apodais. Sendo a melhor opção para o movimento retilíneo, assim como para o movimento serpentino, esta combinação de geometria determinística com textura favorece também o movimento sanfonado do robô. Este movimento, que é ideal para situações onde o robô deve adentrar locais estreitos ou subir tubulações verticais, pode ser descrito como uma combinação dos movimentos retilíneo e serpentino. Com elevado valor para o coeficiente de atrito na direção tangente, o robô possui condições necessárias para ancorar regiões de seu corpo enquanto impulsiona as demais para frente. O movimento sanfonado pode não ser o mais eficiente mas pode ser considerado como uma ferramenta a mais para o robô apodal.

Em suma, a utilização de geometria hexagonal nas placas resultou em uma maior condição de atrito anisotrópico relativo à direção, enquanto a geometria curva só apresentou

valores concisos a partir do momento em que também se utilizou de textura. Para ambos os casos, a textura reproduzida pelo aumento do ângulo de impressão das placas resultou em um acréscimo do coeficiente de atrito em todas as direções. A Tabela 8 reúne os resultados obtidos de todos os quatro padrões testados.

Tabela 8 - Comparativo entre resultados dos 4 padrões testados

		Vantagens	Desvantagens	Aplicação Ideal
Sem Textura	Hexagonal	Coeficientes baixos Grande diferença entre direções	Sem diferença no sentido	Movimento Serpentino
	Curvo	Diferença entre sentidos Diferença entre direções	Diferenças mínimas	Movimento Retilíneo
Com Textura	Hexagonal	Maior diferença entre direções	Coeficientes altos Sem diferença no sentido	Movimento Sinuoso Lateral
	Curvo	Grande diferença entre direções Grande diferença entre sentidos		Compatível com todos

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

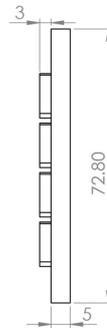
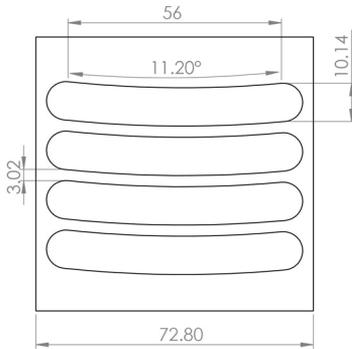
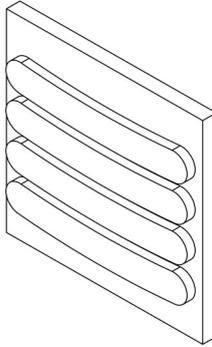
- Abdel-Aal, H. et al. **Preliminary investigation of the frictional response of reptilian shed skin.** *Wear*, v. 290-291, p. 51-60, 2012.
- Akbarzadeh, A. et al. **Generating Snake Robot Concertina Locomotion Using a New Dynamic Curve.** *IJMO*, p. 134-140, 2011.
- Andersson, S.; Söderberg, A.; Björklund, S. **Friction models for sliding dry, boundary and mixed lubricated contacts.** *Tribology International*, v. 40, n. 4, p. 580-587, 2007.
- Archard, J. **Friction — An Introduction to tribology.** *Tribology International*, v. 8, n. 6, p. 268, 1975.
- Avitzur, B. **The Hydrodynamic Model of Sliding Inclined Planes and its Two Limits: Coulomb/Amonton Friction and Fluid Slug Rigid Body Flow.** *Tribology Transactions*, v. 36, n. 2, p. 249-257, 1993.
- Bartlett, P.P.; Wagner, E. (2009). **Pythons.** New York: Barron's Educational Series. ISBN 0-7641-4244-5.
- Borghini, A. et al. **Tribological effects of surface texturing on nitriding steel for high-performance engine applications.** *Wear*, v. 265, n. 7-8, p. 1046-1051, 2008.
- Cuervo, P. et al. **Development of low friction snake-inspired deterministic textured surfaces.** *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.*, v. 4, n. 2, p. 024013, 2016.
- Dowling, K. **Limbless locomotion.** Pittsburgh, Pa.: Carnegie Mellon University, The Robotics Institute, 1997.
- França, T. **Friction Considerations on an Apodal Robot Movement Study.** IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2016.
- GAYMER, R. **New Method of Locomotion in Limbless Terrestrial Vertebrates.** *Nature*, v. 234, n. 5325, p. 150-151, 1971.
- Geffen, V. **A Study of Friction Models and Friction Compensation.** Department Mechanical Engineering – Technische Universiteit Eindhoven, 2009
- Gmiterko, A.; Kelemen, M.; Virgala, I. **The Snake Rectilinear Motion Modeling on the Flat Inclined Surface.** *MECHANICS*, v. 2, n. 4, p. 39-42, 2012.
- Granosik, G.; Hansen, M.; Borenstein, J. **The OmniTread serpentine robot for industrial inspection and surveillance.** *Industrial Robot*, v. 32, n. 2, p. 139-148, 2005.
- Guimarães, P. P. et al. **A bio-inspired apodal and modular robot.** University of Brasília, 2016.
- Hatton, R.; Choset, H. **Generating gaits for snake robots: annealed chain fitting and keyframe wave extraction.** *Autonomous Robots*, v. 28, n. 3, p. 271-281, 2009.
- Hazel, J. et al. **Nanoscale design of snake skin for reptation locomotions via friction anisotropy.** *Journal of Biomechanics*, v. 32, n. 5, p. 477-484, 1999.
- Hirose, S. **Biologically inspired robots.** Oxford: Oxford University Press, 1993.

- Hirose, S. Yamada, H. **Snake-like robots [Tutorial]**. IEEE Robotics & Automation Magazine, v. 16, n. 1, p. 88-98, 2009.
- Hopkins, J.; Spranklin, B.; Gupta, S. **A survey of snake-inspired robot designs**. Bioinspir. Biomim., v. 4, n. 2, p. 021001, 2009.
- Hu, D. et al. **The mechanics of slithering locomotion**. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 106, n. 25, p. 10081-10085, 2009.
- J. Gray, **The Mechanism of Locomotion in Snakes**. Journal of experimental Biology, 1946 Edition, Springer
- Kalani, H. **Effect of Friction Models on Snake Robot Performance**. IJMO, p. 129-133, 2011.
- Liljebäck, P. et al. **Snake robots**. London: Springer, 2013.
- Liptak, C. **Venomous Snakes of the World** . By Mark O'Shea . 2011. Princeton University Press. (ISBN 9780691150239). 160 pages. Paperback. The American Biology Teacher, v. 74, n. 1, p. 57-58, 2012.
- Lu, Z. et al. **Study on the motion control of snake-like robots on land and in water**. Perspectives in Science, v. 7, p. 101-108, 2016.
- Marvi, H. et al. **Sidewinding with minimal slip: Snake and robot ascent of sandy slopes**. Science, v. 346, n. 6206, p. 224-229, 2014.
- Mattison, C. **The encyclopedia of snakes**. London: Cassell Paperbacks, 2002.
- M. Nosonovsky and B. Bhushan, **Green Tribology**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012
- Olsson, H. et al. **Friction Models and Friction Compensation**. European Journal of Control, v. 4, n. 3, p. 176-195, 1998.
- Owen, T. **Biologically Inspired Robots: Snake-Like Locomotors and Manipulators by Shigeo Hirose** Oxford University Press, Oxford, 1993, 220 pages, incl. index. Robotica, v. 12, n. 03, p. 282, 1994.
- Parker, H. Grandison, A. **Snakes, a natural history**. Ithaca, N.Y.: Cornell University Press, 1977.
- Patil, D. Eriten, M. **Effects of Interfacial Strength and Roughness on the Static Friction Coefficient**. Tribol Lett, v. 56, n. 2, p. 355-374, 2014.
- Péter, K. et al, **Robot Applications**. BME MOGI, 2014
- SNEEL - gabriella levine. Disponível em: <<http://gabriellalevine.com/SNEEL>>. Acesso em: 8 jun. 2016.
- Taxidermy Net. Disponível em: <<http://www.taxidermy.net/>>. Acesso em: 8 jun. 2016.
- Transth, A. et al. **3-D Snake Robot Motion: Nonsmooth Modeling, Simulations, and Experiments**. IEEE Trans. Robot., v. 24, n. 2, p. 361-376, 2008.
- UMETANI, Y. HIROSE, S. **Biomechanical Study on Serpentine Locomotion**. Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, v. 10, n. 6, p. 682-686, 1974.

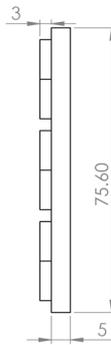
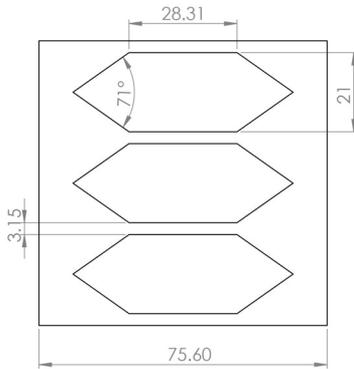
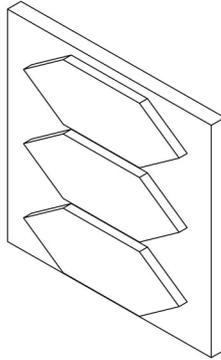
- Wang, X. et al. **Serpenoid polygonal rolling for chain-type modular robots: A study of modeling, pattern switching and application.** Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, v. 39, p. 56-67, 2016.
- Yıldırım, Ş.Yaşar, E. **Development of an obstacle-avoidance algorithm for snake-like robots.** Measurement, v. 73, p. 68-73, 2015.
- Zhao, J.; Han, Z.; Liu, G. **Development of a serpentine omnitread robot for searching in explosive gas atmospheres.** Industrial Robot, v. 38, n. 5, p. 469-475, 2011.

ANEXO I: Desenhos técnicos das placas fabricadas para realização de medições do coeficiente de atrito estático.

Ver documento a parte



	Projetista	Rafael França Jayme	UnB	
	Disciplina:	Projeto de Graduação 2		
	Projeto:	Estrutura de Robô Cobra		
Escala:	1:2	Material:	ABS	Data: 22/06/16
Folha A4		Título:	PLACA CURVA	Unidade: mm
Tolerância geral:	+0.400 -0.400			Folha Nº: 1/2



	Projetista	Rafael França Jayme	UnB Data: 22/06/16 Unidade: mm
	Disciplina:	Projeto de Graduação 2	
	Projeto:	Estrutura de Robô Cobra	
Escala:	1:2	Material:	ABS
Folha A4	Título:		Unidade: mm
Tolerância geral:	PLACA HEXAGONAL		Folha Nº:
+0,400 -0,400			2/2