

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE CABOS PARA UM SNAKE ARM ROBOT
por

Nícolas Macedo Magalhães

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2020

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Magalhães, Nicolas Macedo
SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE CABOS PARA UM SNAKE
ARM ROBOT / Nicolas Macedo Magalhães. -- 2020.
26 f.
Orientador: Rafael Antônio Comparsi Laranja.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2020.

1. Cabo de aço. 2. Robô tipo cobra. 3.
Dimensionamento de cabos. I. Laranja, Rafael Antônio
Comparsi, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Nícolás Macedo Magalhães

SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE CABOS PARA UM SNAKE ARM ROBOT

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Projeto, Fabricação e Automação Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Antônio Comparsi Laranja

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. Fabiano Disconzi Wildner

Prof. Dr. Rafael Antônio Comparsi Laranja

Porto Alegre, novembro de 2020

DEDICATÓRIA

Dedicado a todos aqueles que se julgam parte disso, pois realmente são.

Magalhães, Nícolas. SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE CABOS PARA UM SNAKE ARM ROBOT. 2020. XXVI. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

RESUMO

O presente estudo aborda o dimensionamento dos cabos de aço atuantes em um braço mecânico do tipo cobra (snake-arm robot), cuja motivação é criar um modelo geral aplicável em robôs de diversos tamanhos e, com isso, contribuir com a popularização desse tipo de tecnologia que pode ter diversas aplicações. É construído um modelo em CAD 3D, com aproximadamente 17 kg e 1 m de comprimento para calcular o mínimo diâmetro necessário do cabo de aço para garantir um coeficiente de segurança maior ou igual a 5. É tomada como premissa a utilização de cabo de aço com alma também de aço, pela maior resistência a tração. Como resultado são obtidos dois tipos de cabos, ambos com diâmetro de 6,4 mm e escolhe-se aquele que dentre as propriedades de construção traz maior flexibilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Cabo de aço, robô tipo cobra, dimensionamento de cabos.

Magalhães, Nicolas. SELECTING AND SIZING CABLES FOR A SNAKE ARM ROBOT. 2020. XXV. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

ABSTRACT

The present study addresses the sizing of steel cables acting on a snake-arm robot, the motivation is to create a general model applicable to robots of different sizes and thereby contribute to the popularization of this type technology that can have many applications. A 3D CAD model is constructed, with approximately 17 kg and 1 m in length to calculate the minimum diameter needed, of the steel cable, to guarantee a safety coefficient greater than or equal to 5. The defined material is steel cable with core also made of steel, for greater tensile strength. As a result, two types of cables are obtained, both with a 6.4 mm diameter and the one that was chosen is the construction with greater flexibility.

KEYWORDS: Steel cable, snake-arm robot, cable sizing.

NOMENCLATURA

A_m	Área da seção resistente	[mm ²]
d	Diâmetro do cabo	[mm]
D	Diâmetro da polia	[mm]
d_w	Diâmetro do fio de arame	[mm]
Δy	Deslocamento admissível, ponto de inflexão	[mm]
$\Delta y_{m\acute{a}x}$	Deslocamento máximo admissível	[mm]
E_r	Módulo de Young	[MPa]
F_b	Carga equivalente de flexão	[N]
F_f	Tração admissível de fadiga	[N]
F_r	Força resultante da tração nos cabos	[N]
F_t	Força de trabalho do cabo	[N]
F_u	Carga mínima de ruptura do cabo	[N]
g	Aceleração gravitacional	[m/s ²]
L_{cabo}	Comprimento total do cabo	[m]
L_R	Distância da base ao centro de massa	[mm]
M	Massa do mecanismo	[kg]
M_{cabo}	Massa do cabo	[kg/m]
N_c	Número de cabos	
n_f	Coefficiente de segurança em fadiga	
n_s	Coefficiente de segurança estático	
p	Pressão de suporte	[MPa]
P	Peso do mecanismo	[N]
ϕ	Ângulo formado com o movimento	
S_u	Resistência última de tração no cabo	[MPa]
T	Tração no cabo	[N]
T_{c1}	Tração no cabo 1	[N]

T_{c2}	Tração no cabo 2	[N]
T_x	Componente x da tração no cabo	[N]
T_y	Componente y da tração no cabo	[N]
w	Peso de um modelo de cabo	[N/m]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	1
1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
1.3. OBJETIVO	2
2. FUNDAMENTAÇÃO	2
2.1. METODOLOGIA	2
2.2. APRESENTAÇÃO DOS COMPONENTES	3
2.3. CONSTRUÇÕES E TIPOS DE TORÇÃO DE CABOS DE AÇO	4
2.4. PASSO E LUBRIFICAÇÃO	6
2.5. EQUACIONAMENTO	6
2.5.1. CARGA EQUIVALENTE DE FLEXÃO	7
2.5.2. TRAÇÃO ADMISSÍVEL DE FADIGA	7
2.5.3. TRAÇÃO DE TRABALHO	8
2.5.4. COEFICIENTES DE SEGURANÇA E CONSIDERAÇÕES	9
3. CASO DE ESTUDO	9
3.1. ANÁLISE CINEMÁTICA	10
3.1.1. SITUAÇÃO DE REPOUSO TOTALMENTE ESTICADO	10
3.1.2. DINÂMICA SITUACIONAL DO BRAÇO TOTALMENTE ESTICADO	11
3.2. DEFINIÇÃO DA SITUAÇÃO MAIS CRÍTICA	13
4. RESULTADOS	14
5. CONCLUSÕES	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
ANEXOS	17

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

A principal motivação deste estudo foi a percepção da necessidade de trazer para o cotidiano das pessoas este mecanismo versátil e que pode ter diversas aplicações, o braço mecânico do tipo cobra. Este é um mecanismo distinto dos robôs populares atualmente, eles possuem elementos redundantes ligados por elos flexíveis, o que abre um vasto leque de possibilidades e configurações geométricas que esse tipo de mecanismo pode assumir. Este tipo de braço mecânico possui uma proposta muito inovadora e que ainda não é muito explorada, enquanto os robôs mais populares são aqueles que simulam o braço humano e que, portanto, tem várias limitações em questão de espaço e área útil de movimento (Dong, 2015). A Figura 1 a seguir traz como exemplo um mecanismo desse tipo, modelo desenvolvido pela empresa OC Robotics. Acredita-se que a implementação de estudos nessa área pode trazer um grande benefício no dia a dia das pessoas, devido às mais diversas aplicações que se pode dar a esse mecanismo dada a sua versatilidade.

Figura 1 – Explorer Snake-arm Robor desenvolvido pela OC Robotics.

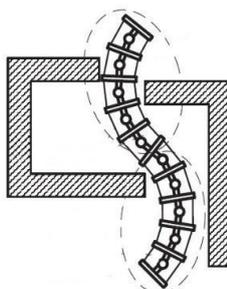


Fonte: <https://www.ocrobotics.com/>, 2020.

1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os snake-arm robots conseguem realizar movimentos impossíveis para robôs com elementos rígidos. Na Figura 2, a seguir, percebe-se um movimento para mecanismos desse tipo são simples e que dificilmente são reproduzidos por um braço mecânico padrão. Nota-se que nas regiões destacadas o corpo do robô é curvado em direções opostas o que traz uma versatilidade ainda maior.

Figura 2 - Robô do tipo cobra desviando de obstáculos.



Fonte: Dong, 2014.

Atualmente os braços mecânicos já estão estabelecidos como tecnologia e estão em constante melhoria, com diversos tipos de construção e variados componentes sendo testados e implementados. O braço mecânico do tipo cobra segue uma linha que visa solucionar problemas de atuação em situações extremas e/ou impossíveis para os modelos tradicionais. Durante as pesquisas iniciais, que serviram de base para este estudo, pode-se encontrar vários modelos diferentes e construídos de formas diferentes. Um exemplo é o braço construído com a utilização de discos estreitos ligados por molas e com uma junta universal fazendo a sustentação enquanto a atuação é feita por cabos. Outros exemplos são os robôs que usam um tubo de material elástico passando em toda a extração do robô, funcionando como a coluna vertebral humana e dando a sustentação necessário ao componente, mas ao mesmo tempo mantendo uma elasticidade e versatilidade nos movimentos muito maior do que pode-se obter quando se usa a junta universal conforme descrito por Kell (2011).

Dentre as aplicações encontradas, verificou-se que esses protótipos já são capazes de realizar soldas em situações onde os humanos não poderiam chegar por questões geométricas, por ser um local de difícil acesso ou por riscos à saúde. Além de soldagens, esses robôs conseguem fazer cortes em locais determinados, com precisão, utilizando laser, podem também ser utilizados com câmeras e lanternas na extremidade para realizar inspeções em tubulações ou dentre os escombros de desmoronamentos. Existem aplicações propostas até mesmo na área da saúde, auxiliando em cirurgias como instrumento principal e também como um instrumento auxiliar como a proposta por Berthet-Rayne (2018).

1.3. OBJETIVO

O objetivo deste estudo é o dimensionamento dos cabos de acionamento de um robô do tipo cobra. O estudo busca garantir que o cabo utilizado possa suportar as trações críticas sem falha por ruptura ou de funcionamento do robô de uma forma geral. Para isso, é proposta uma situação na qual os testes são realizados analisando os pontos mais críticos e garantindo que as trações não ultrapassem os valores limites.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1. METODOLOGIA

Primeiramente é feita a apresentação da metodologia geral que é utilizada, um roteiro de todos os passos que são seguidos. Em seguida os componentes são mostrados individualmente para compreensão total do mecanismo e da importância de cada uma das peças de sua construção. Em última instância são colocadas as equações juntamente com suas variáveis e as condições de contorno utilizadas na modelagem do problema.

Após a análise dos principais modelos existentes dentre os modelos desenvolvidos por Hyun-Soo em 2009, que possuía discos mais largos e uma única mola e o modelo de Dong de 2015 que foi projetado com a utilização de uma junta universal e 4 molas trazendo rigidez e sustentação, optou-se pela utilização dos discos estreitos ligados por uma junta esférica, utilizando, também, dois pares de molas para dar rigidez e sustentação. O segundo passo foi elaborar a construção de um modelo 3D da montagem completa, para visualização e compreensão total do mecanismo em vários ângulos e pontos de vista. O modelo foi construído utilizando o software de CAD 3D -, desenhado peça por peça e posteriormente montado como um mecanismo inteiro e funcional, essa montagem serve como guia ilustrativo dos movimentos realizados. A montagem do componente no software de CAD também possibilitou a obtenção

das massas de cada componente, o que é necessário para o cálculo das trações. O terceiro passo foi a busca pelas equações que regem o movimento e as resistências em cabos de aço, assim como as resistências e densidades dos materiais envolvidos. Uma vez reunidos os dados, pode-se dar início ao cálculo e a análise crítica dos resultados.

2.2 APRESENTAÇÃO DOS COMPONENTES

O modelo de construção escolhido para este estudo é ilustrado na Figura 3, a seguir, gerada através de um software CAD 3D. Cada componente foi desenhado e dimensionado para uma configuração pré-determinada que é descrita em detalhes ao decorrer do estudo.

Figura 3 - Estrutura desenhada em software CAD 3D, mostrando todos os elementos.

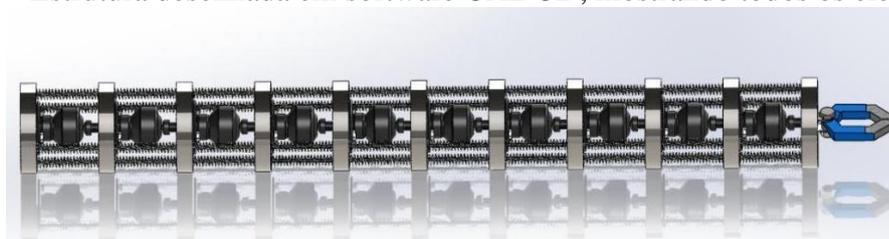
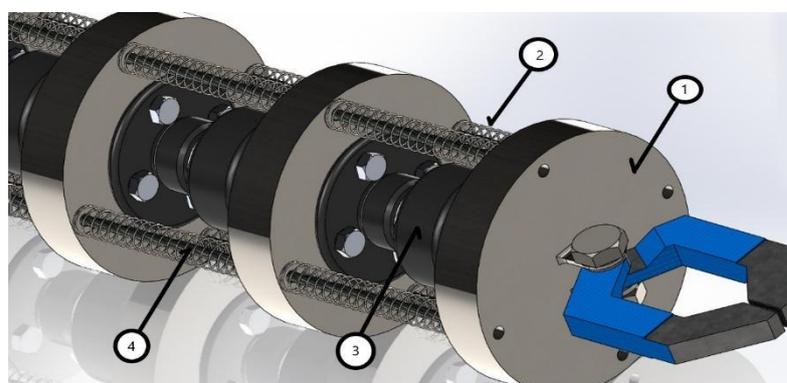


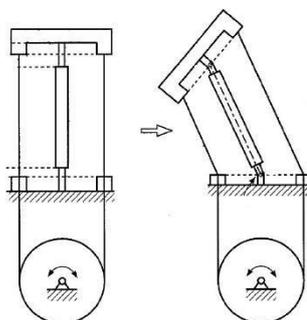
Figura 4 - Zoom na parte frontal do modelo enumerando cada componente de montagem.



1. **DISCOS DE SUSTENTAÇÃO:** Os discos estão enumerados com índice 1 na Figura 4, eles são utilizados para trazer rigidez ao componente e também servem como um anteparo para os cabos, os quais não podem ter movimento livre. Os discos possuem furações que servirão de guia. O primeiro disco é fixado na base de uma forma que não lhe seja permitido nenhum grau de liberdade. A base do braço mecânico pode ser móvel ou fixa, a mobilidade da base é interessante pois aumenta o alcance do braço e o possibilita a chegar em locais que tem o acesso dificultado.
2. **MOLAS:** As molas são importantes no funcionamento do mecanismo pois além de trazer rigidez, ajudam na estabilidade dos movimentos. Elas estão enumeradas com índice 2 na Figura 4. Pode-se utilizar configurações com molas que possuem valores diferentes de rigidez e assim ter um ajuste fino, aplicando uma força que causará uma deformação maior em determinada mola e por consequência o segmento no qual essa

- mola estiver fará um movimento diferente dos demais. Entretanto nesse estudo são utilizadas molas com a mesma rigidez ao longo de todo o corpo do robô.
3. **JUNTA ESFÉRICA:** A junta esférica é mostrada na Figura 4 com índice número 3 e com ela consegue-se alcançar um movimento suave e com uma folga mínima. Pois o processo de fabricação deste componente visa possibilitar que a superfície da esfera tenha sua geometria copiada no suporte e a partir disso obter contato total entre ambos. Os movimentos do componente são dirigidos e limitados por uma junta esférica de modelo RBI, ou seja, um modelo no qual o parafuso de montagem e os suportes estão dispostos no mesmo eixo pois esse tipo de configuração admite a aplicação de cargas axiais. Como o lubrificante deste modelo fica contido no calço, encontra-se neste caso um alto poder de lubrificação e alta resistência ao desgaste.
 4. **CABOS:** Nesse tipo de robô, os cabos são os elementos que servirão como atuadores do sistema. Eles estão destacados com o índice 4 na Figura 4. É através deles que os movimentos são conduzidos e calibrados. Na montagem os cabos são presos na extremidade do robô, no último disco, e entrelaçados em uma polia na base do mesmo. Como foram usados 4 cabos, são necessárias duas polias, pois cada uma delas é responsável pela atuação de dois cabos, conforme é visto na Figura 5 a seguir. Os movimentos nas polias são dados por motores que se adequam ao sistema.

Figura 5 - Exemplo de montagem dos cabos e polias em um robô do tipo cobra.



Fonte: Dong, 2014.

Em relação a matéria prima e construção foram escolhidos os cabos de aço, mas como a fabricação e os materiais utilizados variam de acordo com a aplicação, segue uma breve explanação baseadas no manual técnico de cabos da CIMAF, de 2012 e no livro Projeto de Engenharia Mecânica, Shigley, et. al, 2005.

2.3. CONSTRUÇÕES E TIPOS DE TORÇÃO DE CABOS DE AÇO

Construção é o termo aplicado para indicar o número de pernas e de arames em cada perna. Portanto um cabo com construção 6x19, por exemplo, é um cabo que possui 6 pernas com 19 arames em cada. Na Figura 6 a seguir cada um desses elementos e suas respectivas posições são ilustrados.

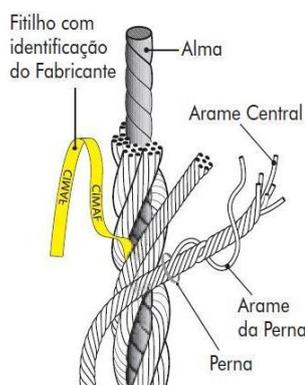
Os arames podem ter o mesmo diâmetro entre si ou diâmetros diferentes, dependendo das condições necessárias para aplicação. Entretanto, os arames com diâmetro maior devem ser

colocados na parte mais externa do cabo, para aumentar a resistência ao desgaste provocada pelo atrito.

A alma de um cabo de aço é um núcleo em torno do qual as pernas são torcidas, conforme indicado na Figura 6 a seguir, sua principal função é garantir que os esforços no cabo sejam distribuídos uniformemente ao longo do mesmo. A alma pode ser formada de fibra natural, fibra artificial, uma perna ou por um cabo de aço independente.

As almas de fibra trazem maior flexibilidade aos cabos, o material usado como fibra natural é o sisal e para aqueles cabos com fibra artificial usa-se polipropileno. Almas de aço garantem maior resistência ao amassamento e aumentam a resistência à tração, este tipo de construção tem capacidades de carga maiores, mas a sua massa também é maior quando comparada com cabos de alma de fibra.

Figura 6 – Elementos de construção de um cabo de aço.



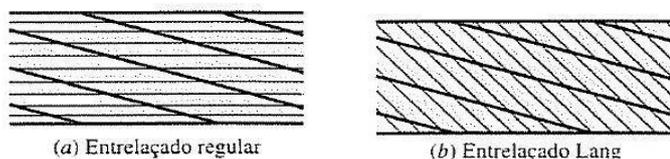
Fonte: CIMAF, 2012.

Em relação aos tipos de torção, as pernas podem ser torcidas para direita ou esquerda, entretanto esta última é pouco utilizada. Dentro do tipo de torção direita, tem-se duas categorias de entrelaçados, o entrelaçado regular e o entrelaçado Lang, na Figura 7 a seguir é possível visualizar como é feito cada um dos dois modelos.

No entrelaçado regular os arames das pernas são torcidos em sentido oposto à torção das próprias pernas e como resultado tem-se que os arames ficam posicionados aproximadamente paralelos ao eixo longitudinal do cabo. As cordas de entrelaçamento regular, não enroscam, nem desenrolam e são fáceis de manipular. Além disso elas possuem boa resistência ao desgaste interno, a amassamentos e deformações devido ao curto comprimento dos arames expostos.

Nos cabos que utilizam torção do tipo Lang os arames das pernas são torcidos no mesmo sentido que o das próprias pernas. Sendo assim, os arames externos ficam posicionados diagonalmente ao eixo longitudinal do cabo e, portanto, eles terão uma área exposta maior quando comparados com o entrelaçado regular. Este tipo de configuração dispõe de uma maior resistência a abrasão e a fadiga, além de trazer uma flexibilidade maior ao cabo. Entretanto, sofrem mais desgaste interno e são mais suscetíveis a enroscar e desenrolar, por isso, é indicado que suas extremidades estejam fixadas.

Figura 7 - Tipos de torção em cabos de aço.



Fonte: Shigley, et al., 2005.

2.4. PASSO E LUBRIFICAÇÃO

O passo dos cabos de aço é medido como a distância, paralela ao eixo do mesmo, necessária para que uma das pernas faça uma volta completa em torno do eixo do cabo. A lubrificação é muito importante na proteção contra corrosão e também para diminuir o efeito de desgaste por atrito gerado pelo movimento relativo das pernas do cabo e do contato entre o corpo do cabo e as superfícies de polias, tambores e outras as quais eles estejam sujeitos. Os cabos são lubrificados no processo de fabricação, mas é recomendado que periodicamente sejam submetidos a novos processos de lubrificação.

A cada processo de lubrificação o cabo deve ser limpo e todo o lubrificante velho deve ser retirado da superfície, importante salientar que não pode ser usado solvente nessa etapa, pois pode-se prejudicar as propriedades físicas dos componentes. A melhor maneira de lubrificar é utilizar um método que lubrifique continuamente o cabo durante a operação, este método pode ser de imersão, gotejamento e/ou pulverização. O ponto de aplicação de lubrificante é preferencialmente aquele onde o cabo passa por polias ou tambores, pois nestes pontos tem-se a uma pequena abertura entre as pernas na parte superior do cabo.

2.5 EQUACIONAMENTO

Dentre os diversos tipos de construção dos cabos, também se encontram diversos valores para suas cargas de trabalho e carga de ruptura, pois estes parâmetros variam de acordo com os materiais utilizados, o número de pernas e fios e o tipo de entrelaçamento. A carga de trabalho de um cabo de aço é a carga de utilização na aplicação a qual ele se destina. A carga de ruptura mínima de cada cabo é definida por meio de ensaios de tração e disponibilizada pelo fabricante.

Um coeficiente de segurança é calculado comparando a carga de trabalho com a carga de ruptura mínima, sendo que, essa última deve ter um valor suficientemente maior para garantir segurança na utilização e também garantir o desempenho e a durabilidade do cabo.

Para dimensionar o cabo ideal para uma determinada aplicação, primeiramente é necessário conhecer algumas propriedades e seus respectivos valores. A seguir tem-se a Tabela 1 trazendo as equações para se encontrar propriedades úteis dos cabos e suas unidades. O sistema de unidades usualmente utilizado no dimensionamento de cabos é o imperial. Portanto a tabela é importada da literatura de referência com as unidades nesse sistema, entretanto o dimensionamento será adaptado para o sistema internacional, uma vez que todos os parâmetros estejam definidos.

Tabela 1 - Propriedades úteis dos cabos de aço.

Corda de fio	Peso por pé w, lbf/ft	Peso por pé incluindo núcleo w, lbf/ft	Diâmetro mínimo de polia D, in	Melhor diâmetro de polia D, in	Diâmetro dos fios d _w , in	Área de metal A _m , in ²	Módulo de Young da corda E _r , psi
6x7	1,52d ²	-	42d	72d	0,111d	0,38d ²	13x10 ⁶
6x19	1,60d ²	1,76d ²	30d	45d	0,067d	0,40d ²	12x10 ⁶
6x37	1,55d ²	1,71d ²	18d	27d	0,048d	0,40d ²	12x10 ⁶

Fonte: Shigley, et al., 2005.

Uma vez que estão estabelecidas as propriedades físicas do cabo, pode-se fazer uma análise das equações que regem o comportamento do material quando submetido a cargas de trabalho.

2.5.1. CARGA EQUIVALENTE DE FLEXÃO

A tração em um cabo pode ser calculada como a Equação 1 que segue, a partir da Mecânica dos Sólidos, tem-se que a tração é distribuída, pela área da seção transversal do cabo, de forma axial. Uma tração de fio de corda que possui mesmo valor que a flexão da polia é denominada carga equivalente de flexão (F_b).

$$F_b = \sigma \cdot A_m = \frac{E_r \cdot d_w \cdot A_m}{D_{polia}} \quad (1)$$

Na equação 1 temos o Módulo de Young (E_r) em psi, o diâmetro dos fios (d_w) em in, a área de metal (A_m) em in² e o diâmetro de polia em in.

A Equação 1 nos mostra a importância de utilizar um diâmetro de polia consideravelmente maior que o diâmetro do cabo, pois a carga equivalente de flexão é descontada da tração de ruptura do material no cálculo do coeficiente de segurança. Cada tipo de cabo traz consigo uma denominação de diâmetro mínimo de polia conforme indicado na Tabela 1.

2.5.2. TRAÇÃO ADMISSÍVEL DE FADIGA

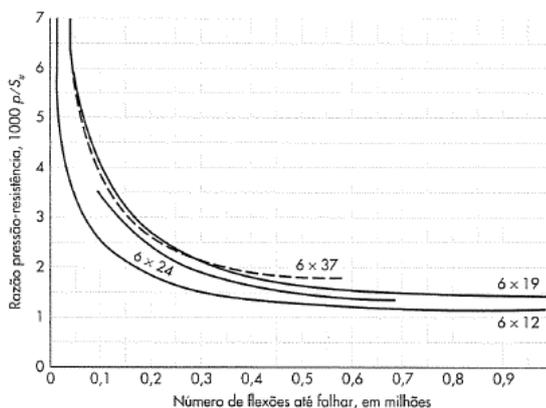
Quando um cabo está sob tração devido a cargas externas e também quando está sendo fletido sobre uma polia, o material se desgasta devido ao atrito e, também, pelas pequenas deformações causadas pelo carregamento. A quantidade de desgaste depende da tração de suporte, que é a tração da corda no sulco da polia e também no contato com outras superfícies gerando atrito. A tensão de suporte é dada pela Equação 2 descrita a seguir. Onde F é a força de tração na corda, d é o diâmetro do cabo e D é o diâmetro da polia.

$$p = \frac{2 \cdot F}{d \cdot D} \quad (2)$$

Essa tensão de suporte (p) atua em conjunto com a resistência última de tração no fio (S_u), que é a resistência mínima para ruptura de um dos fios de arame que compõe o cabo. O valor dessa resistência é disponibilizado pelo fabricante, mas também existem tabelas com valores aproximados, para uma análise inicial. Um diagrama de fadiga também pode ser obtido

para corda de fio, a Figura 8 a seguir mostra um diagrama desse tipo onde a ordenada é a razão da tração de contato pela resistência $\left(\frac{p}{S_u}\right)$ e a abscissa é número de flexões até a falha. O gráfico da Figura 8 mostra que o cabo terá uma longa vida em fadiga se o valor da razão multiplicado por 1000 ficar abaixo de 1, pois assim garante-se uma utilização dentro da região de segurança, abaixo da curva de falha por fadiga.

Figura 8 - Relação experimental entre a vida de fadiga do cabo.



Fonte: Shigley, et al., 2005.

$$S_u = \frac{2000 \cdot F}{d \cdot D} \quad (3)$$

As unidades dessa Equação devem ser relacionadas com as unidades da força de tração na corda. Dividindo os dois lados da Equação pela resistência última do fio e solucionando para força de tração obtêm-se a equação da tração admissível de fadiga, como a seguir.

$$F_f = \frac{\left(\frac{p}{S_u}\right) S_u \cdot d \cdot D}{2} \quad (4)$$

2.5.3. TRAÇÃO DE TRABALHO

A tração de trabalho do cabo, deve ser definida de acordo com a aplicação, o profissional responsável deve avaliar as cargas e os parâmetros geométricos aos quais o cabo é submetido. Shigley, et. al, 2005 mostra algumas premissas como primeiras considerações que devem ser tomadas ao analisar um carregamento. As quais seguem:

- O peso conhecido ou morto.
- Cargas adicionais por paradas ou partidas.
- Cargas de choque.
- Fricção de polia de mancal.

As cargas devem ser somadas antes de serem comparadas com as resistências para o cálculo do coeficiente de segurança.

2.5.4. COEFICIENTES DE SEGURANÇA E CONSIDERAÇÕES

Os coeficientes de segurança mínimos para utilização de cabos são indicados por normas regulamentadoras. Essas normas regulamentam aplicações tradicionais dos cabos de aço, tais como elevadores e guindastes. De acordo com Shigley, et al., 2005, para operação média se utiliza fatores de segurança de valor 5 e em operações onde há risco de vida os valores adotados devem ser de 8 ou 9.

O fator de segurança estático é definido como seguem as equações a seguir, as duas formas são aceitas, mas a descrita na Equação 6 desconta o valor da carga equivalente de flexão da tração de ruptura e isso vai de encontro com uma segurança maior quando o valor do fator de segurança é mantido na comparação.

$$n = \frac{F_u}{F_t} \quad (5)$$

$$n_s = \frac{F_u - F_b}{F_t} \quad (6)$$

O coeficiente de segurança para vida em fadiga do cabo segue a mesma metodologia de cálculo do coeficiente estático, entretanto em vez de utilizar a resistência última de ruptura utilizamos a resistência à fadiga de tração. A Equação 7 a seguir descreve este coeficiente.

$$n_f = \frac{F_f - F_b}{F_t} \quad (7)$$

Como considerações finais de dimensionamento deve-se salientar que o cálculo do coeficiente de vida em fadiga é baseado em construções onde os cabos são utilizados em conjunto com polias ou tambores de grandes diâmetros. Em contrapartida, nem sempre essa é uma realidade na aplicação e para isso tem-se diâmetros mínimos de polia que podem ser utilizadas com cada tipo de cabo, porém, para estes casos as equações para o cálculo da vida em fadiga perdem sua funcionalidade, é necessário a obtenção de novas equações. Para estes casos tem-se a seguinte orientação: (Shigley, et al., 2005) “*O fator de segurança em carregamento de fadiga pode ser definido como na Equação 7 ou utilizando-se uma análise estática e compensando com um fator grande de segurança aplicável ao carregamento estático.*”

3. CASO DE ESTUDO

Neste capítulo é abordado um estudo de caso como aplicação para o braço robótico do tipo cobra abordado no texto inicial. O primeiro passo do estudo foi a definição das condições de contorno do problema, ou seja, a escolha da geometria e das dimensões que foram utilizadas. Optou-se pela construção de um braço robótico com 1 m de comprimento, a robustez da montagem foi definida especificamente para fins do dimensionamento dos cabos, nenhuma aplicação em específico foi determinada para esta montagem, portanto a parte frontal do robô traz um desenho ilustrativo de uma garra que poderia ser trocado por uma câmera, uma lanterna ou uma pistola laser, conforme a aplicação solicite. A modelagem e os cálculos realizados visam

garantir a mobilidade do corpo do robô com esforços que estejam dentro dos limites de escoamento e de fadiga do cabo.

Tabela 2 - Descrição dos elementos contidos na montagem e de suas propriedades.

Descrição	Material	Massa [kg]	Quantidade na montagem
Discos	Aço 1020	1,2	11
Molas	fio repuxado a frio (A227)	0,0016	40
Juntas Esféricas	Liga de zinco	0,506	10
Cabos	Aço com alma de aço ou de fibra	A definir	4

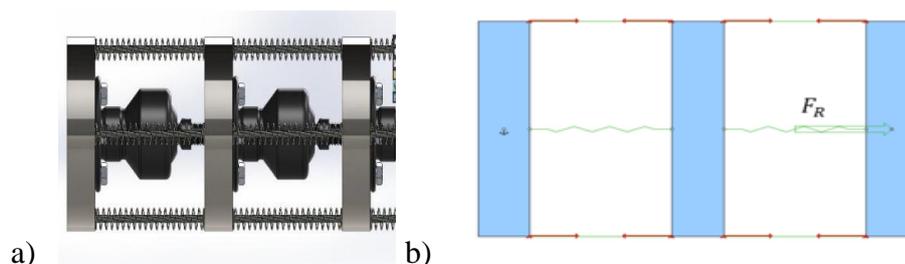
3.1. ANÁLISE CINEMÁTICA

Com a utilização de um software de apoio, construiu-se um modelo cinemático do braço mecânico com o intuito de verificar os resultados obtidos analiticamente. Foram analisadas três configurações de posicionamento para o mecanismo. Cada uma das situações tem a sua análise detalhada posteriormente. Antes disso é necessária uma avaliação analítica do problema em uma escala maior, ou seja, uma análise do movimento que acontece a cada conjunto de redundância do corpo do robô.

3.1.1. SITUAÇÃO DE REPOUSO TOTALMENTE ESTICADO

Conforme a imagem indicada a seguir, pode-se verificar que, como se sabe, as forças transmitidas por cabos ou cordas são axiais aos eixos dos mesmos. Portanto verifica-se que quando o corpo do robô está esticado, não se tem nenhuma força no eixo vertical, capaz de compensar o peso do disco. Por isso, conclui-se que sempre haverá um balanço na extremidade mais distante da base, esse balanço consiste em um movimento oscilatório que pode ser controlado, mas não pode ser anulado. Na Figura 9, a seguir, vê-se três blocos, um fixado, colocados em balanço sob atuação das forças de tração nos cabos e sob influência da força de reação gerada pelos elementos centrais do corpo do robô (junta esférica e molas), na representação as setas em vermelho indicam a tração gerada na corda e aquela em verde é a força de reação.

Figura 9: a) Discos tendo seu peso suportado pela força de tração no cabo, representação em CAD 3D e b) no software de simulação 2D (Working Model).



Com uma análise estática do problema, isola-se o último bloco nessa configuração e calcula-se para o equilíbrio de corpo livre, obtêm-se o equacionamento que segue, com o somatório de forças no eixo x:

$$\Sigma F_x = 0 \quad (8)$$

$$F_R = T_{c1} + T_{c2} \quad (9)$$

Onde pode-se concluir que a força de reação é a soma das trações nos dois cabos. Escolhendo um ponto D qualquer no corpo do bloco e paralelo a linha de ação da tração de uma das cordas, nota-se que a tração deve possuir o mesmo valor em ambos os cabos. Isso faz sentido porque o cabo é entrelaçado na polia e movimentada ambos os lados, conforme mostrado na figura 5, e por ser o mesmo cabo é esperado que tenhamos uma tração igual ao longo do mesmo.

$$\Sigma M_D = 0 \quad (10)$$

$$T_{c1} = T_{c2} = \frac{F_R}{2} \quad (11)$$

Por isso, a melhor nomenclatura para tração é apenas a letra T, e como simplificação, colocou-se o número de cabos utilizados no problema para destacar que a força nesse caso é igualmente distribuída entre eles.

$$T = \frac{F_R}{N_c} \quad (12)$$

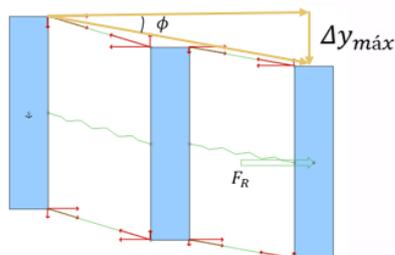
Para o somatório de forças no eixo y, não obtêm-se equilíbrio nessa configuração, o que mostra que a força gravitacional que age sobre o corpo não é compensada, portanto sempre haverá um início de movimento causado pela aceleração da gravidade atuando no corpo massivo, essa força é denominada como força peso (P).

$$\Sigma F_y = P = M \cdot g \quad (13)$$

3.1.2. DINÂMICA SITUACIONAL DO BRAÇO TOTALMENTE ESTICADO

Na Figura 10 pode-se perceber que a atuação da gravidade já causou um deslocamento inicial nos blocos, entretanto também é possível notar que a força de tração no cabo pode ser decomposta em duas forças atuantes uma no eixo x e outra no eixo y, sendo esta última aquela que trará o corpo novamente para posição inicial, uma vez que assuma um valor suficientemente grande.

Figura 10 - Blocos em equilíbrio dinâmico, trações e suas respectivas componentes.



Inicia-se a análise da mesma forma, isolando o último bloco e buscando o equilíbrio de forças pode-se definir um valor mínimo para o qual a componente do eixo y, da força de tração

na corda, sustentará o peso. É importante notar que quando o movimento se inicia, o cabo se inclina formando um triângulo retângulo entre os blocos, onde o valor do ângulo é definido pelo valor limite de amplitude do movimento e o valor do comprimento do cabo como hipotenusa em cada segmento. Todavia, quando for feita a consideração total do braço mecânico deve-se utilizar a distância até o centro de massa da estrutura para garantir a estabilidade.

Calcula-se então a tração mínima no cabo necessária para ter uma amplitude de balanço máxima $\Delta y_{máx}$ em mm, sabendo que o ponto de inflexão do movimento, por se tratar de um modelo oscilatório é em Δy , como segue:

$$\Delta y = \frac{\Delta y_{máx}}{2} \quad (14)$$

$$\phi = \arcsen\left(\frac{\Delta y}{L}\right) \quad (15)$$

Tendo isso em mente, pode-se fazer o cálculo dos esforços no eixo x buscando o equilíbrio, conforme mostrado a seguir. Nesse caso utiliza-se somente a componente horizontal da força F_R , entretanto existe uma componente vertical que não é relevante nessa análise e por isso não é descrita.

$$\Sigma F_x = 0 \quad (16)$$

$$F_R = N_c \cdot T_x \quad (17)$$

$$T_x = T \cdot \cos(\phi) \quad (18)$$

$$T = \frac{F_R}{N_c \cdot \cos(\phi)} \quad (19)$$

Como resultado do equacionamento é obtida uma Equação para tração na corda dependente do número de cabos, da força resultante e do ângulo ϕ . Dando sequência a dedução, fez-se o mesmo para os esforços no eixo y como segue:

$$\Sigma F_y = 0 \quad (20)$$

$$P = N_c \cdot T_y \quad (21)$$

$$T_y = T \cdot \sen(\phi) \quad (22)$$

$$T = \frac{P}{N_c \cdot \sen(\phi)} \quad (23)$$

E obteve-se uma segunda Equação também para a tração na corda, igualando as duas e resolvendo para força de reação, chega-se em uma Equação dependente apenas da massa do componente e também das propriedades geométricas propostas. A Equação é descrita a seguir e nota-se que o balanço inicial só é nulo quando a força de reação tender ao infinito, ou seja, quando a tração na corda também tender a valores muito altos.

$$F_R = \frac{P}{\tan(\phi)} \quad (24)$$

Uma vez que são conhecidos os valores de tração necessários para sustentação do braço mecânico com um balanço máximo estipulado, pode-se analisar caso a caso a posição do centro

de massa em cada configuração geométrica do mecanismo e calcular qual a tração mínima no cabo para sustentá-lo.

3.2. DEFINIÇÃO DA SITUAÇÃO MAIS CRÍTICA

Nesta etapa são analisados três casos visando a determinação do caso mais crítico, que é aquele utilizado para o dimensionamento. A primeira é aquela na qual o robô está estendido, totalmente esticado. A segunda é quando o braço mecânico encontra-se realizando uma curva de 90° para o lado direito ou esquerdo, ainda com o corpo paralelo ao solo. O terceiro momento de análise visa garantir a estabilidade do robô ao erguer o corpo acima do nível da base, fazendo um ângulo reto com o solo. A Tabela 3 a seguir descreve cada situação indicando os valores obtidos para cada variável do problema. As equações utilizadas na definição do valor de cada variável são aquelas propostas anteriormente.

Analisando a Tabela 4 a seguir é possível notar que o cálculo é feito pela posição do centro de massa do componente e que nos casos onde o centro de massa não está alinhado com a base do braço mecânico, utilizam-se as componentes para determinar a real distância entre a linha de ação da força gravitacional e a base.

Figura 11 – Casos para estudo, mostrando força peso (P) e braço de alavanca (L_R) atuando no centro de massa.



Tabela 3 – Valores de entrada para definição dos esforços.

Situação	Massa total M_T , em kg	Aceleração gravitacional g, em $\frac{m}{s^2}$	Peso P, em N	Deslocamento Máximo $\Delta y_{m\acute{a}x}$, em mm	Ponto de inflexão Δy , em mm	Número de cabos N_c
Caso 1	17,06	9,807	167,3	10	5	4
Caso 2	17,06	9,807	167,3	10	5	4
Caso 3	17,06	9,807	167,3	10	5	4

Tabela 4 – Esforços calculados para análise.

Situação	Distância 1 do centro de massa L_1 , em mm	Distância 2 do centro de massa L_2 , em mm	Distância resultante do centro de massa L_R , em mm	Ângulo obtido ϕ	Força resultante F_R , em kN	Tração no cabo T , em kN
Caso 1	490	0	490	0,010204	16,40	4,10
Caso 2	431	88	440	0,011367	14,72	3,68
Caso 3	431	0	431	0,011601	14,42	3,61

Verificando os resultados obtidos nessa análise pode-se perceber que o caso mais crítico é o primeiro, o que faz sentido mecanicamente pois é quando o centro de massa está mais distante da base pois o braço de alavanca é o maior possível considerando qualquer posição que o mecanismo pode assumir. Portanto a análise dimensional deve ser feita utilizando o valor tração no cabo obtido para o caso 1.

4. RESULTADOS

O dimensionamento é então realizado conforme foi discutido no capítulo 2 tomando como necessidade um coeficiente de segurança estático (n_s) com valor mínimo 5. Para isso é utilizado como força de trabalho (F_t) o valor de tração no cabo (T) recém calculado acrescido do peso do próprio cabo em cada situação. As propriedades físicas de cada cabo variam com seu diâmetro portanto este é o parâmetro crucial do dimensionamento.

A seguir têm-se uma Tabela que descreve as propriedades dos melhores candidatos em cada categoria. Foram utilizadas as três construções mais usuais, descritas por Shigley et al, 2005, que foram mostradas na Tabela do Capítulo 2 em conjunto com a Tabela de diâmetros possíveis para cada construção, divulgada por uma fabricante de cabos (CIMAF, 2012). A Tabela traz informações com diversas unidades de medida, porém todas as unidades são convertidas para o sistema internacional.

O método de avaliação foi realizar o cálculo para cada diâmetro disponível na Tabela do fabricante em cada uma das categorias, começando do menor possível e aumentando até que o valor mínimo do coeficiente de segurança fosse alcançado. Decidiu-se por utilizar somente cabos com alma de aço pela alta resistência a tração aliada com a uma flexibilidade satisfatória.

Tabela 5 - Parâmetros calculados para dimensionamento de cabo de aço.

Tipo de cabo	Diâmetro do cabo d , em in	Carga mínima para ruptura F_u , em tf	Peso do cabo w , em lbf/ft	Diâmetro mínimo da polia D_{polia} , em in	Diâmetro de cada fio do cabo d_w , em in	Área de metal A_m , em in^2	Módulo de Young E_r , em psi
6x7	0,1875	1,49	0,0534	7,875	0,02081	0,013	$13 \cdot 10^6$
6x19	0,2500	2,68	0,1100	7,500	0,01675	0,025	$12 \cdot 10^6$
6x37	0,2500	2,70	0,1068	4,500	0,01200	0,025	$12 \cdot 10^6$

Tabela 6 - Comparação de valores de coeficiente de segurança obtidos.

Carga	6x7	6x19	6x37
F_u , em N	14611,91	26281,82	26477,95
F_b , em N	2041,59	2980,16	3558,40
F_t , em N	4100,78	4101,61	4101,56
n_s	3,06	5,68	5,59

Analisando os valores obtidos, nota-se que para construção 6x7 não foi possível obter o valor mínimo admissível para o coeficiente de segurança nem mesmo quando chegou no maior diâmetro de cabo disponível no catálogo do fabricante para esta categoria. Em relação aos demais tipos verifica-se que o ambos os cabos atingiram um valor próximo no coeficiente de segurança, embora o 6x19 tenha alcançado um valor levemente superior devido a diferença no valor da carga equivalente de flexão F_b pela influência do diâmetro mínimo da polia admitido pelos cabos dessa configuração.

Contudo, para determinar qual a melhor opção dentre estes dois tipos, em vez de utilizar somente o valor absoluto do coeficiente de segurança que deve uma diferença em torno de 1%. Decidiu-se ainda verificar as propriedades físicas mais adequadas para aplicação. De acordo com o catálogo da CIMAF, 2012, tem-se as informações a seguir:

- Cabos 6x19: Boa resistência a flexão e boa resistência a abrasão. Esta classe é uma das mais utilizadas e está disponível nas bitolas mais comuns.
- Cabos 6x37: A grande quantidade de arames dos cabos desta classe torna-os altamente flexíveis. Eles estão disponíveis nas bitolas mais comuns e se adaptam bem quando necessitam trabalhar dinamicamente. Em bitolas maiores eles possuem alta resistência ao amassamento para operações mais críticas.

Para a aplicação de construção de um braço mecânico versátil do tipo cobra, visa-se como primordial a flexibilidade do mecanismo e conseqüentemente do cabo utilizado. Portanto foi decidido que o cabo ideal para a construção é aquele com construção do tipo 6x37 com 6,4mm de diâmetro, pois atende os requisitos de segurança e garante a flexibilidade necessária para sustentação de robô com aproximadamente 17 kg.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo foi possível construir um modelo versátil e funcional do equacionamento do movimento do braço mecânico e também um método de dimensionamento dos cabos que pode ser reutilizado para qualquer formação desejada. O cálculo foi feito com um estudo de caso, com parâmetros previamente definidos, mas obteve-se uma modelagem geral e que pode ter seus parâmetros e condições de contorno alterados para qualquer tamanho de mecanismo que seja almejado.

Os resultados que foram atingidos condizem com o que era esperado para as condições impostas inicialmente. Indica-se como continuação deste trabalho um estudo sobre a automação do mecanismo e também uma análise comparativa entre os tipos de juntas que podem ser utilizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Shigley, J. E. “**Mechanical Engineering Design**”, first metric edition, McGraw-Hill Book Company, 1986.

Shigley, J. E. Mischke, C. R. Budynas, R. G. “**Projeto de Engenharia Mecânica**”, 7ed, bookman, 2005.

DONG, XIN. “**A Novel Continuum Robot Using Twin-Pivot Compliant Joints**”. Journal of Mechanisms and Robots, 2015.

YOON, HYUN-SOO. “**A 4-DOF Flexible Continuum Robot Using a Spring Backbone**” Hanyang University, 2009.

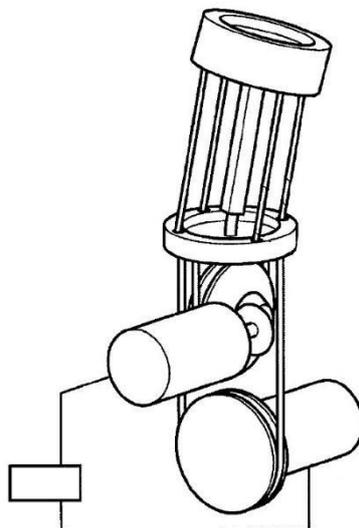
CIMAF. “**Manual Técnico de Cabos de Aço**”, Belgo Bakaert Arames, 2012.

BERTHET-RAYNE, PIERRE. “**The Snake Robotic Platform for Endoscopic Surgery**” Imperial College London, 2018.

DONG, XIN. KELL, JAMES. “**Design and analysis of a family of snake arm robots connected by compliant joints**”. Manufacturing Technology University of Nottingham, 2014.

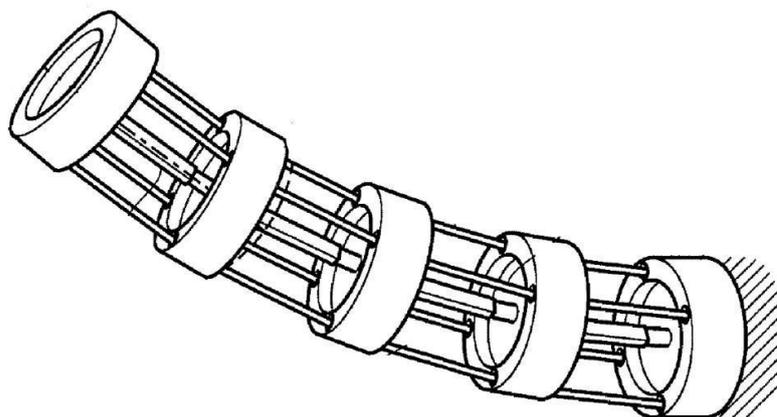
ANEXOS

Figura 1 – Ilustração da forma como as polias atuam no sistema de um snake-arm robot.



Fonte: Dong, 2014.

Figura 2 – Snake-arm robot realizando movimento de inclinação, partindo de uma base fixa.



Fonte: Dong, 2014.