Vitor Finotto Cores

Robô contínuo telescópico para tarefas em alturas elevadas

São Paulo

2009

Vitor Finotto Cores

Robô contínuo telescópico para tarefas em alturas elevadas

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

São Paulo
2009

Vitor Finotto Cores

Robô contínuo telescópico para tarefas em alturas elevadas

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Engenharia
Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo
Horikawa

São Paulo

2009

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 20 de agosto de 2009.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Cores, Vitor Finotto

**Robô contínuo telescópico para tarefas em alturas elevadas
/ V.F. Cores. -- ed.rev. -- São Paulo, 2009.
140 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.**

**1. Robôs 2. Robótica 3. Mecanismos I. Universidade de São
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Meca-
trônica e de Sistemas Mecânicos II. t.**

Dedico este trabalho de pesquisa ao meu irmão, que sempre me incentivou a ir em frente e vencer as dificuldades na trajetória deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho de pesquisa não seria possível sem a preciosa colaboração direta ou indireta de várias pessoas. Sou especialmente grato à todas elas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Oswaldo Horikawa, pelo seu apoio, confiança e paciência, que foram fundamentais na realização e finalização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. André Riyuiti Hirakawa pelos conselhos e sugestões, que foram de fundamental importância no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Isaias da Silva e a Profa. Dra. Larissa Driemeier pelas inúmeras dúvidas esclarecidas.

À minha família por todo apoio, carinho e confiança depositados em mim.

Aos amigos, Danilo Vieira, Décio Rinaldi, Gilberto Menezes, Ivan Pirozelli, Pedro Antunes e Rogerio Yamamoto pela amizade, compreensão e ajuda mútua ao longo do período de mestrado.

RESUMO

Observando-se as diversas aplicações de robôs na área de serviços é possível perceber uma crescente busca por manipulação de ferramentas em lugares elevados utilizando dispositivos robóticos, visto que tais tarefas exigem a utilização de diversos equipamentos de segurança e apresentam um alto risco à presença humana. Os exemplos mais comuns desse tipo de tarefa são: inspeção de: máquinas de grande porte, tanques de armazenamento, silos, postes, linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, etc. Com o intuito de aplicar robôs a essas tarefas, e consequentemente aumentar a segurança e eficiência dessas operações, foi realizado, primeiramente neste trabalho, um estudo sobre as classes de robôs manipuladores existentes. Para tanto adotou-se uma classificação que separa os robôs de acordo com o número de juntas, o que gera uma divisão em três diferentes grupos, robôs discretos, robôs do tipo serpente e robôs contínuos. Ao analisar as três classes, observa-se que os robôs contínuos possuem mais graus de liberdade que os outros grupos, apresentando como estrutura uma coluna vertebral continuamente deformável, que em oposição aos tradicionais manipuladores robóticos elo/junta/elo, possuem mecanismos mais simplificados, controle menos complexo devido ao menor número de atuadores e podem interagir com obstáculos encontrados em seu ambiente sem criar grandes forças de contato. Ao utilizar configurações extrínsecas, ou seja, posicionando os atuadores fora da estrutura do robô, e transmitindo o movimento utilizando cabos, é possível construir robôs com alta isolamento elétrica, o que é de grande utilidade para operações que envolvem tarefas nas proximidades de redes elétricas de alta tensão. Apesar das diversas vantagens, não foram encontradas na literatura aplicações de robôs contínuos na realização de tarefas em alturas elevadas. Levando em consideração as vantagens oferecidas pelos robôs contínuos, este trabalho propõe o estudo e a aplicação de um robô do tipo contínuo que possua uma arquitetura mais adequada para realizar trabalhos a alturas elevadas. Com o intuito de demonstrar as vantagens oferecidas por essa arquitetura, será realizado um estudo de caso no qual o objeto a ser inspecionado são as cruzetas de madeira em postes de distribuição de energia elétrica. Em uma segunda etapa, elabora-se o projeto mecânico do robô contínuo proposto, onde são detalhados os mecanismos propostos e são feitas simulações utilizando o método dos elementos finitos para analisar o comportamento da

estrutura quando submetida a carregamentos. Em uma terceira etapa, adotando-se uma estratégia de controle seqüencial é elaborado o projeto de controle. Em uma ultima etapa, com o intuito de analisar o funcionamento do robô é construído um protótipo, com o qual são feitos os testes.

Palavras-chave: Robôs contínuos. Mecanismo telescópico. Arquitetura de robôs. Inspeção de redes de distribuição elétrica.

ABSTRACT

Among several applications of robots in the service field, it is possible to percept an increasing interest in manipulate tools in higher positions using automatic devices, due to the fact that such activities are high risked operations and demands the use of several safety equipments. The most common examples of this kind of activity are the inspection of machines, silos, electrical distribution poles, etc. With the aim of apply robots to these activities and increase the safety and efficiency in these operations, as a first step in this work is done the study of different kinds of manipulators. Adopting a classification based on the number of joints, it is possible to separate robots in three different classes: discrete robots, snake-like robots and continuum robots. By analyzing these classes, it is possible to say that continuum robots have more degrees of freedom than the robots of others groups; Compared with the classic discrete robots, continuum robots have simplified mechanisms, simpler control scheme due to the small number of actuators and, in the case of an obstacle, they can contour the obstacle without generating high contact forces. By positioning the actuators out of the robot structure and transferring the motion using cables, i.e., adopting an extrinsic actuation, it is possible to build continuum robots with high electric insulation that is important in applications in which the robot must work near of an electrical distribution network. Despite these advantages, no previous works concerning the use of continuum robots to work in higher positions were found in the literature. Considering the advantages offered by continuum robots, this work proposes a study and application of a continuum robot that uses a more suitable architecture to work in higher positions. Aiming to demonstrate the advantages provided by this architecture, It will be used a case study, in which, the object to be inspected is the wood cross-arms of an electrical poles used in the electrical distribution networks. In a second step, it is done the mechanical project of the robot, where the proposed mechanisms are explained and structural simulations using the finite element method are performed in order to analyze how the structure would react to loads. In a third step, by adopting a strategy of sequential control, it is done the control project. In the last step, with the aim of analyze the robot in practical situation, a prototype is built, which is used to perform the tests.

Keywords: Continuum robots. Telescopic mechanism. Robot design. Electric power network inspection.

LISTA DE SÍMBOLOS

A - Área da seção transversal

E - Módulo de Elasticidade

L - Comprimento da estrutura

I - Momento de inércia da seção transversal

G - Módulo de elasticidade transversal

J - Momento de inércia polar da seção transversal do elemento

$[k_e]$ - Matriz de rigidez do elemento de pórtico espacial nas coordenadas locais

$[m_e]$ - Matriz de massa do elemento de pórtico espacial nas coordenadas locais

$\{f_e\}$ - Vetor de carregamentos nas coordenadas locais

$[T]$ - Matriz de transformação das coordenadas locais para globais

$[K_e]$ - Matriz de rigidez do elemento de pórtico nas coordenadas globais

$[M_e]$ - Matriz de massa do elemento de pórtico nas coordenadas globais

$\{F_e\}$ - Vetor de carregamentos nas coordenadas globais

$\{u\}$ - Vetor de deslocamentos nas coordenadas globais

φ - Função de interpolação, ou função de forma

m^* - Massa generalizada

k^* - Rigidez generalizada

c^* - Amortecimento Generalizado

Ψ - Modo de vibrar de uma estrutura

y - Amplitude das vibrações ao longo de um pórtico engastado

ω_n - Frequência natural de vibração circular

f_n - Frequência natural de vibração cíclica

$\{\ddot{x}(t)\}$ - Vetor de aceleração

$\{\dot{x}(t)\}$ - Vetor de velocidade

$\{x(t)\}$ - Vetor de deslocamento

$\{f(t)\}$ - Vetor de forças aplicadas ao sistema

$[M]$ - Matrizes de massa da estrutura

$[C]$ - Matriz de amortecimento da estrutura

$[K]$ - Matriz de rigidez da estrutura

$[\lambda_r]$ - Matriz dos autovalores

$[\Psi]$ - Matriz dos autovetores

$\{\psi\}_r$ - Vetor de deslocamento modal

$[\phi]$ - Matriz modal normalizada em relação à massa

$[I]$ - Matriz identidade

$\{\mathfrak{F}\}$ - Vetor de força nas coordenadas modais

$\{q\}$ - Vetor deslocamento em coordenadas modais

$\{X\}$ - Deslocamento em coordenadas espaciais

δ - Deformações por forças de primeira ordem

N - Carregamento normal à estrutura

H - Carregamento gerado pelos esforços de segunda ordem ao utilizar o método P-delta

$M(s)$ - Função de transferência do motor

$\omega(s)$ - Transformada de Laplace da velocidade angular do eixo do motor DC

$V_i(s)$ - Tensão de entrada do motor DC

τ_m - Constante de tempo do motor DC

k_ω - Constante de velocidade do motor DC

$Y(s)$ - Função de transferência da estrutura

ξ - Constante de amortecimento

$G(s)$ - Função de transferência da planta

K_{mec} - Constante do mecanismo

Δ - Deslocamento imposto

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais trabalhos desenvolvidos utilizando robôs contínuos	39
Tabela 2 – Propriedades geométricas dos tubos utilizados.....	76
Tabela 3 – Definição do número de interações para o processo P-delta	85
Tabela 4 – Ensaio para obtenção do curso máximo do mecanismo de acionamento	104
Tabela 5 – Análise estatística dos resultados experimentais	117

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– a) Robô Industrial Kuka b) Robô explorador SRV1 c) Robô social Ubot	19
Figura 2 – Classificação de robôs por seu número de articulações	21
Figura 3 - Robô discreto com seis graus de liberdade	22
Figura 4 – Robôs serpente : ACM III, ACM R3 e ACM –R4	23
Figura 5– Robôs serpente: Oblix Mogura e Souryu I e II	24
Figura 6 – Robô serpente Ommitread	24
Figura 7 – Robôs serpente aquático :ACM -R5	24
Figura 8– Robô Soft Gripper – Segurando objetos e elevando pessoas	25
Figura 9 – Robô CT-Arm	25
Figura 10 - a) Seção transversal de um tentáculo mostrando a alta densidade de fibras musculares. b) Robô contínuo Octoarm.	26
Figura 11 – Exemplos de músculos hidrostáticos	27
Figura 12 – Princípio de funcionamento de um robô contínuo extrínseco	28
Figura 13 - <i>Tensor Arm Manipulator</i> desenvolvido por Anderson	29
Figura 14– Tromba de elefante robótica desenvolvida por Hannan	30
Figura 15– a) Ilustração de Atuador Intrínseco Planar b) Músculo pneumático FESTO.	31
Figura 16– a) Necessidade de aprisionar mísseis em um navio militar, b) Mão robótica desenvolvida por Orndorff c) Mão robótica manipulando um míssil.	31
Figura 17– Configuração usual de robô contínuo intrínseco espacial	32
Figura 18– Princípio de funcionamento de um robô contínuo intrínseco	33
Figura 19– Atuador flexível proposto por Suzumori	33
Figura 20– a) Robô manipulador AMADEUS b) Manipulador contínuo utilizado no robô AMADEUS	34
Figura 21– Robô contínuo Slim Slime	35
Figura 22– a) Princípio de funcionamento do micro-atuador piezelétrico b) principais componentes.	36
Figura 23– Princípio de funcionamento de um robô contínuo híbrido	37
Figura 24 – Robô contínuo KSI	38
Figura 25 – Robô contínuo Air-Octor	38
Figura 26 – Exemplo de obstáculo a) Robô discreto b) Robô Contínuo	40

Figura 27– Mecanismo telescópico retraído	45
Figura 28– Princípio de funcionamento de um mecanismo telescópico	46
Figura 29 – Elemento de pórtico espacial	48
Figura 30– Conectividade de uma estrutura telescópica	51
Figura 31– Sistema de coordenadas globais do elemento de pórtico	52
Figura 32– Pórtico engastado de seção constante	54
Figura 33– Três primeiros modos de vibrar de uma viga engastada de seção constante	56
Figura 34– Sistema MMA com massa, amortecimento e rigidez generalizadas	61
Figura 35– Método P-Delta	63
Figura 36- Modelo de torre estaiada	64
Figura 37- Configurações usuais de torres estaiadas	65
Figura 38– Princípio de funcionamento do mecanismo de atuação	66
Figura 39 – Estabilidade do robô em posições intermediárias	66
Figura 40 – Princípio de funcionamento do mecanismo auxiliar para estrutura telescópica	67
Figura 41– Diagrama de blocos da planta do sistema de controle	69
Figura 42– Dimensões principais de um poste de transmissão	73
Figura 43– Área de difícil acesso a ser inspecionada	74
Figura 44– Estrutura telescópica esbelta instável	76
Figura 45– Estabilização da estrutura por meio de estais.	77
Figura 46– Fluxograma de funcionamento dos programas desenvolvidos	78
Figura 47– Discretização da estrutura	79
Figura 48 – Deformação da estrutura ao aplicar uma carga unitária (Apêndice C)	80
Figura 49– Análise da resposta em relação a discretização da estrutura (Apêndice C)	81
Figura 50– Aplicando condições de contorno não homogêneas à estrutura	82
Figura 51– Estrutura deformada ao aplicar $\Delta = 1,5$ metros	83
Figura 52– Primeiro modo de vibrar da estrutura	84
Figura 53- Simulação de estabilidade aplicada a diferentes materiais	87
Figura 54- Simulação utilizando Aço	87
Figura 55- Simulação utilizando Alumínio	88

Figura 56 – Simulação utilizando PVC	88
Figura 57– Decomposição das forças geradas pelo mecanismo de acionamento	89
Figura 58 – Deformação da estrutura devido ao processo iterativo P-Delta	90
Figura 59 – Mecanismo de recolhimento e controle de tensão nos estais	91
Figura 60 – Principais componentes do mecanismo de recolhimento e controle de tensão nos estais	92
Figura 61 – Utilização de espaçadores para grandes deformações	93
Figura 62–Robô contínuo telescópico proposto utilizando espaçadores	94
Figura 63–Ilustração do mecanismo de içamento superior	95
Figura 64- Mecanismo de içamento superior	95
Figura 65–Mecanismo de içamento inferior	96
Figura 66–Mecanismo de içamento – princípio de funcionamento	97
Figura 67–Ilustração do funcionamento do mecanismo de acionamento	98
Figura 68–Ilustração do mecanismo de acionamento para 2 planos	99
Figura 69– Princípio de funcionamento do mecanismo de acionamento	100
Figura 70– Princípio de funcionamento da primeira garra proposta	101
Figura 71– Princípio de funcionamento da segunda garra proposta	102
Figura 72 – Utilização de guias para os estais no mecanismo de acionamento	102
Figura 73– Experimento para determinar a constante do mecanismo	103
Figura 74– Controle remoto, CLP e placa de relés	105
Figura 75 – Esquema de controle em malha aberta	106
Figura 76– Esquema do teste experimental	107
Figura 77– Esquema do teste experimental	108
Figura 78– Primeiras melhorias implementadas	109
Figura 79– Primeira bateria de testes	110
Figura 80– Resultados obtidos na primeira bateria de testes	111
Figura 81– Segunda implementação de melhorias	113
Figura 82– Estrutura de referência	115
Figura 83– Apoio móvel	115
Figura 84– Resultados experimentais obtidos na segunda bateria de testes	116

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Manipulação de ferramentas em alturas elevadas	20
1.2. Classificação de robôs de acordo com o número de articulações	20
1.2.1. Robôs discretos	21
1.2.2. Robôs Serpente	23
1.2.3. Robôs contínuos	26
1.2.3.1. Aplicações dos robôs contínuos	27
1.2.3.2. Classificação de Robôs Contínuos	28
1.2.3.2.1. Robôs Contínuos Extrínsecos	28
1.2.3.2.2. Robôs Contínuos Intrínsecos	30
1.2.3.2.3. Robôs contínuos Híbridos	37
1.2.3.3. Panorama geral dos trabalhos anteriores	39
1.2.3.4. Vantagens fornecidas pelos robôs contínuos	40
1.3. Objetivos	42
1.4. Metodologia	43
2. PROPOSTA DE SOLUÇÃO	44
2.1. Sistema mecânico	45
2.1.1. Arquitetura telescópica	45
2.1.1.1. Análise estrutural estática	47
2.1.1.1.1. Introdução	47
2.1.1.1.2. Proposta de elemento finito	47
2.1.1.1.3. Análise Estática Linear	50
2.1.1.1.4. Análise estrutural dinâmica	53
2.1.1.1.4.1. Análise Modal utilizando o Método dos Elementos Finitos	57
2.1.1.1.4.2. Modelo dinâmico de um grau de liberdade	61
2.1.1.1.5. Análise estática não linear	62
2.1.1.1.5.1. Método P-Delta	62
2.1.1.1.5.2. Instabilidade de estruturas esbeltas	64
2.1.1.2. Mecanismo de atuação e estabilização da estrutura	65
2.2. Sistema de Controle	68
2.2.1. Modelagem da planta em malha aberta	69
2.2.1.1. Modelo Matemático do Motor DC	69

2.2.1.2.	Função de transferência da estrutura	69
2.2.1.3.	Função de transferência da planta	70
3.	ESTUDO DE CASO	71
3.1.	Introdução ao estudo de caso	71
3.2.	Identificação das necessidades	73
3.3.	Projeto mecânico	74
3.3.1.	Análise estrutural do estudo de caso	77
3.3.1.1.	Implementação em ferramenta computacional	78
3.3.1.2.	Análise Estática Linear	79
3.3.1.2.1.	Geração da Malha	79
3.3.1.2.2.	Condições de contorno não homogêneas	82
3.3.1.3.	Análise Dinâmica em um grau de liberdade	84
3.3.1.4.	Análise estática não linear	85
3.3.1.4.1.	Definição do número de interações	85
3.3.1.4.2.	Análise estática não linear do estudo de caso	86
3.3.2.	Mecanismos Propostos	91
3.3.2.1.	Mecanismo de recolhimento e controle de tensão nos estais	91
3.3.2.2.	Mecanismo de Içamento	94
3.3.2.3.	Mecanismo de Acionamento	97
3.3.2.3.1.	Modelamento do mecanismo de acionamento	103
3.4.	Projeto de Controle	104
4.	TESTES EXPERIMENTAIS E MELHORIAS	106
5.	CONCLUSÃO	119
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
APÊNDICE A		131
APÊNDICE B		133
APÊNDICE C		136
APÊNDICE D		138
APÊNDICE E		139

1. Introdução

O estudo da robótica pode ser dividido em duas grandes vertentes, uma delas estuda os consagrados **robôs industriais** e a outra pesquisa **robôs de serviço** [1]. Nos dias atuais observa-se uma terceira grande área de estudo que tem por objetivo desenvolver robôs que interajam socialmente com os humanos [1]. Este tipo de robô é classificado como **robôs sociais** e em literaturas mais recentes já são considerados uma nova linha de estudo. As diferenças entre os três tipos de robôs acima mencionados se dá, não apenas por suas diferenças em forma ou tamanho, mas pelo seu tipo de aplicação. A Figura 1 ilustra um exemplo comercial de cada classe de robôs.

Figura 1– a) Robô Industrial Kuka b) Robô explorador SRV1 c) Robô social Ubot

Os robôs industriais têm sido amplamente usados na indústria de manufatura desde o começo da década de 60, sendo utilizados principalmente para pintar, soldar, transportar e montar, tendo como principais características alta velocidade e precisão de posicionamento [1]. O mercado para robôs industriais cresceu rapidamente nos anos 70 e 80 com um pico de demanda no início dos anos 90. Entretanto, devido às subseqüentes recessões na economia mundial, o mercado para robôs industriais tem diminuído ou estagnado na última década apesar de serem mais precisos, acurados e velozes [1].

Por outro lado, os robôs de serviço representam uma área em pleno desenvolvimento na robótica. Todos os robôs que não são aplicados para fins industriais podem ser classificados como robôs de serviço. Normalmente são classificados em duas grandes categorias: robôs de uso profissional e robôs de uso pessoal [1]. Os robôs de serviço de uso profissional atuam nas mais diversas áreas, como por exemplo, na exploração de novos planetas, inspeção

de componentes ou equipamentos em ambientes de difícil acesso ou de alto risco, auxiliando em cirurgias, ou até mesmo desarmando bombas ou combatendo incêndios dentre muitas outras tarefas. Já os robôs de serviço para uso pessoal incluem robôs domésticos que auxiliam a cortar grama, limpar, organizar, etc.

Já a terceira categoria apresentada, os robôs sociais, não tem como principal característica aspectos como precisão e velocidade. As interações homem-robô têm se tornado muito comuns nos dias atuais numa variedade de aplicações [3], como por exemplo, ajudando a educar crianças, monitorando idosos em hospitais, ajudando pessoas com deficiência ou em reabilitação a se locomoverem ou até mesmo cooperando na terapia ocupacional [4]-[11].

1.1. Manipulação de ferramentas em alturas elevadas

Dentre as diversas atividades presentes na área de serviços é possível destacar o crescente interesse em aplicar a robótica a novas tarefas. O uso e a manipulação de ferramentas em lugares elevados envolvem grandes riscos e exige a utilização de diversos equipamentos de segurança, o que sugere a utilização de dispositivos robóticos. Os exemplos mais comuns desse tipo de tarefa são: inspeção de máquinas de grande porte, tanques de armazenamento, silos, postes, linhas de transmissão de energia elétrica, etc.

Dentro do vasto universo de aplicações aonde robôs vem sendo utilizados, este trabalho irá abordar a aplicação de robôs na área de serviços, em particular, na manipulação de ferramentas de inspeção em alturas elevadas.

1.2. Classificação de robôs de acordo com o número de articulações

Anteriormente foi feita uma classificação de robôs de acordo com sua aplicação. Mas existem outros tipos de classificações para robôs, como por exemplo, classificações por tipo de controle, capacidade de remodelagem, mobilidade, estrutura, etc. Tais classificações são úteis na identificação de um tipo de robô que mais se adéque para uma determinada aplicação.

Pois então, com o intuito de identificar um tipo de robô para tarefas em lugares elevados, foi feita uma classificação de robôs de acordo com as suas propriedades estruturais, mais especificamente de acordo com o número de juntas. Ao realizar tal divisão se obtém três diferentes classes listadas a seguir e ilustradas na Figura 2:

- Robôs Discretos
- Robôs Serpente
- Robôs Contínuos

Figura 2 – Classificação de robôs por seu número de articulações

Durante muitas décadas, a pesquisa sobre manipuladores robóticos foi focada principalmente no desenvolvimento de manipuladores baseados no braço humano. Mas com o decorrer do tempo, o número de articulações foi aumentando além daquelas contidas no braço humano, gerando configurações das mais variadas de manipuladores [12].

1.2.1. Robôs discretos

Os robôs discretos são baseados em um número pequeno de articulações que são serialmente conectadas por elos rígidos. Tais manipuladores têm comprovado serem muito úteis e eficazes para diversas tarefas, mas possuem algumas limitações. A maioria desses robôs tem de 5 a 7 graus de liberdade, como mostra a Figura 3. Em um espaço de trabalho tridimensional, a maioria dos robôs discretos precisa usar todos os seus graus

de liberdade para posicionar a garra que se localiza na extremidade móvel do robô.

Figura 3 - Robô discreto com seis graus de liberdade

Este tipo de disposição é muito eficiente para ambientes abertos, mas quando obstáculos são adicionados ao ambiente, é possível que o manipulador não consiga posicionar a garra de maneira desejada. Esse problema ocorre porque para fazer com que seja possível lidar com os obstáculos do ambiente e posicionar precisamente a garra seria necessário que o robô possuísse mais graus de liberdade.

Como já dito anteriormente, manipuladores discretos se espelham na estrutura do braço humano, mas olhando para outros seres vivos é possível perceber que existem outros tipos de configurações que podem ser utilizadas pela robótica.

Animais como serpentes, polvos e elefantes realizam movimentos em seus membros de tal modo a realizar uma manipulação eficiente de objetos mesmo que sejam muito diferentes em estrutura se comparados com o braço humano. Desde trombas de elefantes a tentáculos de polvos, a estrutura física pode ser a mais diversa, mas todos eles possuem uma característica em comum que é o fato de terem um grande número de graus de liberdade.

1.2.2. Robôs Serpente

Robôs do tipo serpente são também conhecidos como *snake-like robots*, *serpentine*, robôs serpente ou robôs-cobra. Combinam uma alta densidade de elos rígidos muito curtos interconectados por juntas. Essa disposição cria mecanismos que possuem liberdade hiper-redundante, ou seja, mecanismos que possuem um grande número de graus de redundância cinemática, o que faz com que sejam mais flexíveis e adaptáveis quando estão em meios com muitos obstáculos, aumentando o seu desempenho em meios de difícil acesso como, por exemplo, locomoção dentro de um tubo estreito, andar sobre escombros ou subir degraus com alturas elevadas [13]. Robôs que são descritos como manipuladores hiper-redundantes são na maioria dos casos considerados robôs do tipo serpente [14].

O primeiro robô serpente foi desenvolvido por Hirose [15] no Instituto de Tecnologia de Tóquio (*Tokyo Institute of Technology*) em 1974. O robô conhecido como ACM (*Active Cord Mechanism*) é constituído por 20 segmentos que produzem os movimentos de uma serpente ao se locomover no solo. Cada junta consiste de um mecanismo que flete para a direita e para a esquerda. O estudo inicial trata somente da locomoção em um plano, mas posteriormente são desenvolvidos diversos modelos que podem se locomover em um espaço tridimensional. Como principais trabalhos pode-se citar os robôs ACM III [15], ACM – R3 [16], ACM- R4 [17], Souryu I e II , Oblix Mogura [18] , desenvolvidos por Hirose, ilustrados na Figura 4 e 5, e pelo robô OmmiTread desenvolvido pela Universidade de Michigan, ilustrado na Figura 6.

Figura 4 – Robôs serpente : ACM III, ACM R3 e ACM –R4 [15][16][17]

Figura 5– Robôs serpente: Obliv Mogura e Souryu I e II [18]

Figura 6 – Robô serpente Ommitread

Aplicações relacionadas à locomoção aquática são outro objeto de estudo no desenvolvimento de robôs serpente, como exemplo o robô ACM –R5 [19] também desenvolvido por Hirose e ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Robôs serpente aquático :ACM -R5 [19]

Apesar da maior parte dos estudos se focarem em transposição de obstáculos, existem estudos que utilizam as características dos robôs serpente como robôs manipuladores ou garras. Nesse intuito, Hirose desenvolveu uma garra robótica chamada de Soft Gripper que é constituída por diversos

segmentos com a qual é possível segurar objetos das mais diversas formas. E ao controlar a força na ponta de cada elo é possível levantar objetos com rigidez das mais variadas ou até mesmo seres humanos, como ilustrado na Figura 8 [20].

Figura 8— Robô Soft Gripper – Segurando objetos e elevando pessoas [20]

Com o objetivo de desenvolver um robô manipulador do tipo serpente, Hirose desenvolveu um robô chamado *CT-ARM*, para operar em ambientes nucleares onde a presença humana é de alto risco, transportando peças e ferramentas e tendo grande mobilidade, como ilustrado na Figura 9 [21].

Figura 9 – Robô CT-Arm [21]

1.2.3. Robôs contínuos

Diferentemente das duas classes anteriormente citadas, os robôs contínuos não possuem articulações. Manipuladores contínuos flexionam ou estendem continuamente a própria estrutura via deformação elástica, produzindo movimentos similares a trombas ou tentáculos de animais [22]. O robô Octarm ilustrado na Figura 10 é um exemplo de robô contínuo que se baseia nos movimentos de um tentáculo de um polvo e que consegue manipular objetos flexíveis, como por exemplo, uma bola de borracha.

Figura 10 - a) Seção transversal de um tentáculo mostrando a alta densidade de fibras musculares. b) Robô contínuo Octoarm.

Tentáculos de cefalópodes, línguas de mamíferos e lagartos, ou trombas de elefante, são estruturas com alta densidade de fibras musculares, Figura 10, e possuem propriedades biomecânicas únicas, propriedades que lhes dão uma notável diversidade e complexidade de movimentos. São desprovidos de qualquer tipo de esqueleto e, assim sendo, os músculos são os responsáveis por gerar os movimentos necessários para locomoção, deformação, mudança de rigidez e sustentação do corpo além de fornecer as habilidades pelas quais os animais interagem com grande destreza em seus ambientes naturais.

Esse tipo de estrutura é chamada de músculo hidrostático, ilustrado na Figura 11, e têm como principal característica biomecânica a sua invariância de volume, ou seja, a redução de dimensão de uma parte da estrutura irá causar um aumento autocompensador em ao menos uma outra dimensão de sua estrutura [23].

Figura 11 – Exemplos de músculos hidrostáticos

Robôs contínuos são baseados em músculos hidrostáticos e possuem uma estrutura completamente diferente de robôs convencionais. A diversidade de movimentos do reino animal oferece aos pesquisadores inspiração e excelentes exemplos de estrutura e aplicação para manipuladores robóticos [22].

1.2.3.1. Aplicações dos robôs contínuos

Robôs contínuos têm sido amplamente estudados na robótica, pois possuem diversas propriedades que os tornam mais adequados para algumas aplicações. O seu movimento é resultante da deformação de elementos estruturais contínuos permitindo o desenvolvimento de robôs com poucos componentes. Isto faz com que sejam de mais fácil limpeza, tornando-os mais adequados para aplicações envolvendo materiais de alto risco, alimentos ou produtos médicos. A estrutura simples permite que o peso da estrutura seja baixo e permite construir estruturas longas que possam chegar até lugares de acesso restrito, como, por exemplo, tanques de armazenamento, linhas de transmissão de energia elétrica ou tarefas de posicionamento que requeiram baixa acurácia e pequenas cargas, como, por exemplo, inspeção industrial, limpeza e transporte de peças leves [24].

Robôs contínuos também possuem propriedades que favorecem o seu uso em garras robóticas, pois ao utilizar estruturas contínuas e flexíveis como dedos de uma garra robótica, é possível minimizar os riscos de danos ao objeto manuseado [25][26]. Os mecanismos contínuos podem se deformar em vez de gerar grandes forças de contato ao entrar em contato com um obstáculo no

ambiente, o que os faz ideais para o uso em algumas operações na área médica, como, por exemplo, endoscópios ou colonoscópios [27][28] [24].

1.2.3.2. Classificação de Robôs Contínuos

Devido a uma grande variedade de configurações, robôs contínuos são classificados como **intrínsecos**, **extrínsecos** e **híbridos** [12]. A classificação é dada de acordo com a distribuição dos atuadores e o método de atuação. E dependendo dos graus de liberdade da estrutura os três grupos podem ser divididos em espaciais ou planares.

1.2.3.2.1. Robôs Contínuos Extrínsecos

A arquitetura extrínseca é uma técnica de construção de robôs contínuos com baixo peso e diversos graus de liberdade. O princípio de funcionamento consiste em utilizar atuadores remotos e transferir o movimento por meio de cabos, que ao serem tracionados, aplicam forças à estrutura, como ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Princípio de funcionamento de um robô contínuo extrínseco[12]

A estrutura mostrada na Figura 12 consiste em dois terminais rígidos interligados por uma mola. Em uma das extremidades estão presos os cabos que podem ser acionados de forma independente. Ao tensionar os cabos consegue-se deformar a mola e orientar a estrutura em uma determinada direção. Ao acoplar molas em série é possível aumentar os graus de liberdade

e conseqüentemente o volume de trabalho, nesse sentido diversas construções foram desenvolvidas variando o número de secções e cabos de maneira a atender diferentes tipos de tarefas [29][30]. Normalmente os robôs extrínsecos são ocos, o que os torna leves e em algumas ocasiões ideais para o transporte de líquidos ou materiais [12].

A configuração mais comum de robôs extrínsecos é obtida na forma de espinha dorsal (*backbone*). Em 1967 Anderson [31] apresentou um robô chamado TAM (*Tensor Arm Manipulator*), como mostrado na Figura 13, o robô é formado por 15 pequenos elos serialmente conectados com 14 articulações de dois graus de liberdade. Cada junta é acionada por 4 monofilamentos o que gerava um total de 56 cabos para as 14 articulações, três cabos adicionais eram usados para acionar a garra do robô.

Figura 13 - *Tensor Arm Manipulator* desenvolvido por Anderson [31]

Em 1993 Hirose [32] apresentou mecanismos com diferentes configurações, porém utilizando o mesmo princípio de funcionamento. Dentre os robôs apresentados, o mais complexo é constituído de uma mola longa que confere suporte e flexibilidade, enquanto 8 cabos independentes são presos a uma extremidade rígida. Ao tracionar os cabos, a estrutura se deforma no sentido da atuação. Mais recentemente Hannan [33] desenvolveu uma tromba de elefante

robótica, composta ao todo por 16 juntas de dois graus de liberdade, gerando ao todo 32 graus de liberdade como mostra a Figura 14.

Figura 14– Tromba de elefante robótica desenvolvida por Hannan [33]

Tendo uma estrutura leve, flexível e de fácil limpeza, os robôs contínuos extrínsecos ganharam aplicações na área médica. Wendlandt [34] em 1994 desenvolveu uma plataforma continua a qual é utilizada para manipular ferramentas endoscópicas. A plataforma possui três graus de liberdade e é acionada por três cabos independentes devido às restrições de espaço requeridas na endoscopia.

Usando a configuração de espinha dorsal, Simaan [35] apresentou um robô chamado DDU (*Distal Dexterity Unit*), que se diferencia dos trabalhos anteriores em termos de trabalho, aplicação e atuação. No total, a DDU é equipada por sete juntas acionadas e têm seis graus de liberdade independentes. No todo possui 34 graus de liberdade controlados o que lhe permite a manipulação de até três diferentes ferramentas dentro da garganta de pacientes.

1.2.3.2.2. Robôs Contínuos Intrínsecos

A forma mais simples de atuador contínuo é o atuador intrínseco hidráulico planar. Estes, geralmente são constituídos por materiais poliméricos e ao se aplicar uma simples pressão de entrada, o atuador se deforma longitudinalmente como demonstrado na Figura 15.

Figura 15– a) Ilustração de Atuador Intrínseco Planar b) Músculo pneumático FESTO.

A geometria das paredes determina qual será a amplitude do movimento produzida pela deformação. Normalmente, uma das paredes do atuador tem uma rigidez axial diferente das demais paredes. Assim, um aumento na pressão interna resulta na diferença de tensões ao longo do atuador e o mesmo flete para a posição desejada [36].

Existem diversas aplicações para este tipo de mecanismo, um exemplo disso é a mão robótica desenvolvida por Orndorff [37], a qual demonstra a utilização de um mecanismo intrínseco planar como dedos de uma mão robótica desenvolvida para manipular objetos a altas temperaturas, radioativos, criogênicos e objetos que não devem sofrer danos devidos a contato ao serem manipulados, como por exemplo mísseis, como ilustrado na Figura 16.

Figura 16– a) Necessidade de aprisionar mísseis em um navio militar, b) Mão robótica desenvolvida por Orndorff c) Mão robótica manipulando um míssil.

Andorf [38] desenvolveu um manipulador robótico contínuo com o objetivo de simular os movimentos do dedo humano para mover peças em ambientes controlados, tendo como principal vantagem a falta de partes móveis. Devido a tais características, estruturas intrínsecas planares também foram estudadas com o objetivo de construir manipuladores contínuos para transportar objetos [39][40].

Ao utilizar manipuladores contínuos intrínsecos é possível combinar em uma única estrutura o atuador e a estrutura de suporte. Isso leva a uma estrutura simples, compacta e leve, sem a presença de partes móveis e contendo três graus de liberdade, permitindo que a direção e a magnitude do movimento sejam controlados [41]. Uma das configurações mais utilizadas ao construir manipuladores intrínsecos espaciais, mostrado na Figura 17, é obtida ao posicionar câmaras de material polimérico em intervalos regulares em relação a um eixo longitudinal.

Figura 17– Configuração usual de robô contínuo intrínseco espacial

A operação deste tipo de estrutura se dá basicamente por fornecer diferentes pressões para as câmaras que se deformam elasticamente de acordo com as diferenças de pressão. Como mostrado na Figura 18, é essencial para a operação que as pressões internas gerem extensão axial e não expansão radial[12].

Figura 18– Princípio de funcionamento de um robô contínuo intrínseco

Suzumori [42], em 1992 apresentou um tipo de micro-atuador flexível aplicado a manipuladores robóticos, Figura 19. O princípio de funcionamento consiste basicamente em pressurizar três câmaras montadas radialmente em um único cilindro. A montagem é feita de maneira que ao ajustar as pressões nas câmaras obtêm-se o movimento desejado. O manipulador desenvolvido tem como principal característica a capacidade de não só produzir movimentos de flexão, mas também de alongamento.

Figura 19– Atuador flexível proposto por Suzumori [42]

Posteriormente Wilson [43] apresentou um robô que utiliza atuadores similares ao proposto por Suzumori. Aqui o robô é constituído por tubos que, quando pressurizados, fletem em apenas uma determinada direção.

Davies e Lane [44][26] desenvolveram uma garra hidráulica com atuadores extrínsecos planares, com o objetivo de acoplar a garra contínua ao robô AMADEUS, Figura 20, que tem como principal aplicação manipular objetos em operações subaquáticas. O atuador é baseado em uma tromba de elefante sendo muito maior do que todos até então desenvolvidos. O atuador possui 744 mm de comprimento e cada dedo da garra é formada por sanfonas que, ao serem pressurizadas, deformam de maneira a segurar objetos sem causar danos por contato [45].

Figura 20– a) Robô manipulador AMADEUS b) Manipulador contínuo utilizado no robô AMADEUS

Mais recentemente, Ohno e Hirose desenvolveram um robô contínuo intrínseco chamado de Slim Slime Robot (SSR) [46][47], Figura 21(a). O robô é composto por seis módulos com três graus de liberdade cada. Como mostra a Figura 21(b) cada módulo possui uma parede sanfonada que acomoda câmaras sanfonadas as quais se deformam com o aumento da pressão interna e são responsáveis pela movimentação do robô. No início de cada módulo há uma válvula de inserção e no final, uma de exaustão de ar. Com base no SSR, Aoki, juntamente com Hirose e Ohno [47], realizaram algumas mudanças de projeto para garantir mais graus de liberdade ao robô e propuseram uma nova versão do robô, chamada SSR-II (*Slim Slime Robot 2*).

Figura 21– Robô contínuo Slim Slime

Já na área médica, Bailly [49] propôs e desenvolveu um micro-robô aplicado a um cateter. O robô é acionado hidraulicamente e com a variação de pressão em suas sanfonas o que lhe permite mudar seu comprimento, resultando na flexão do robô.

Em 1998 Kallio [50] apresentou um manipulador robótico contínuo intrínseco que manipulava objetos microscópicos. O manipulador possui resolução de microns e sua área de trabalho é de centenas de micros, o sistema de acionamento, como mostrado na Figura 22(a), consiste basicamente em aplicar uma tensão ao atuador piezo-elétrico, que ao ser acionado desloca um volume de óleo para dentro das sanfonas, fazendo com que as mesmas se alonguem e vice versa. Ao acoplar três sanfonas ao sistema é possível obter movimentos em três graus de liberdade, como mostrado na Figura 22(b).

Figura 22– a) Princípio de funcionamento do micro-atuador piezelétrico b) principais componentes.

Em 1995 Ivanescu [62] propôs um atuador que utilizava fluidos reológicos, ou seja, fluidos que mudam sua viscosidade na presença de um campo elétrico. Com isso, estruturas flexíveis poderiam aumentar sua rigidez após chegar às posições desejadas.

Outra forma de atuação intrínseca são os músculos artificiais (*PAM - Polymer Artificial Muscle*), Figura 15(a). Os PAMs são atuadores contráteis e conseqüentemente geram deslocamento em apenas uma direção, sendo possível montar robôs contínuos intrínsecos utilizando diversos músculos para obter movimentos espaciais [51][52]. Outra forma de utilização de músculos foi proposta por Kornbluh em 1998 [53], sugerindo o uso de EPAMs (*Electrostrictive Polymer Artificial Muscle*) para aplicações robóticas ao construir um braço contínuo redundante multi-seção. Os atuadores EPAM contraem quando uma tensão é aplicada ao polímero dielétrico, e assim como os músculos artificiais, resultam em atuadores silenciosos, de baixo peso e compactos.

Outros importantes tipos de atuação, e amplamente pesquisados, são os metais com memória de forma (*SMA – Shape Memory Alloy*), que normalmente são utilizados em aplicações de baixa eficiência e resposta lenta. Em 1988 Ikuta [29] desenvolveu um sistema endoscópico utilizando SMA. Outra

aplicação de robôs contínuos em endoscópios foi feita por Maeda [61] em 1996 e mais recentemente Dario [54] desenvolveu um robô contínuo atuado por SMA para auxiliar em exames de colonoscopia. Posteriormente Fukuda [55] desenvolveu atuadores baseados em SMA e os aplicou a um robô contínuo móvel com objetivo realizar a inspeção de tubos. Outros trabalhos relacionados foram desenvolvidos por Aramaki [56] ao construir um micro manipulador de 5 graus de liberdade, formado por um tubo com 1mm de diâmetro e 80 mm de comprimento que se deforma com o intuito de inspecionar tubos com pequenos diâmetros, e posteriormente Mineta [57] propôs um micro-manipulador utilizando SMA aplicados a um cateter ativo.

1.2.3.2.3. Robôs contínuos Híbridos

Estruturas híbridas seguem um caráter similar a estruturas contínuas extrínsecas acionadas por cabos, exceto que as molas passivas são substituídas por sanfonas ativamente controladas, Figura 23.

Figura 23– Princípio de funcionamento de um robô contínuo híbrido

Em 1994 Hemani [58] propôs uma construção de manipulador contínuo híbrido com diversas seções de dois graus de liberdade. Mais recentemente, um manipulador contínuo híbrido, chamado de tentáculo robótico KSI, foi desenvolvido comercialmente. O KSI é acionado por sanfonas pneumáticas (atuação intrínseca) e motores elétricos que tracionam cabos atados à estrutura, (acionamento extrínseco) [59], Figura 24.

Figura 24 – Robô contínuo KSI

Em 2004 Jones [60] se baseou no trabalho realizado anteriormente por Hannan [33] e desenvolveu um robô contínuo híbrido, mostrado na Figura 25. O robô chamado de Air-Octor é composto por dois cilindros flexíveis. O cilindro exterior é conectado a tendões responsáveis pela flexão da estrutura, enquanto o cilindro interno é acionado pneumáticamente variando o comprimento da estrutura.

Figura 25 – Robô contínuo Air-Octor

1.2.3.3. Panorama geral dos trabalhos anteriores

A tabela 1 resume os diferentes trabalhos realizados sobre robôs contínuos. Os trabalhos relacionados a robôs contínuos intrínsecos são classificados de acordo com o tipo de atuação, já os trabalhos relacionados a robôs contínuos extrínsecos ou híbridos são classificados de acordo com o número de módulos, ou seja, se existem módulos em série ou se o robô consiste de apenas um módulo. Nos campos da tabela são exibidos o nome do pesquisador juntamente com o ano de publicação do trabalho relacionado ao robô e a respectiva referência bibliográfica.

Extrínseco		Intrínseco			Híbrido	
Em série	Não em série	Hidráulico ou Pneumático	Metais com memória	Outros tipos de atuação	Série	Não em série
Anderson-1967 [31]	Wendlant 1994 [34]	Davies 1991 [44]	Cieslak 1999 [28]	Kallio 98 [50]		Jones 2004 [60]
Hirose 1993 [32]		Suzumori 1992 [42]	Ikuta 1988 [29]	Ivanescu 95 [62]		Immega 95 [59]
Hannan 2001 [33]		Wilson 1993 [43]	Fukuda 1989 [55]	Kornbluh 98 [53]		
Simaan[35]		Lane 1999 [26]	Maeda 96 [61]			
		Ohno 2000 [47]	Aramaki 95 [56]			
		Ohno 2001 [45]	Mineta 2001 [57]			
		Aoki 2002 [47]	Lim 1996 [27]			
		Bailly 2004 [49]	Dario 2002 [30]			
		Chen2006 [24]				

Tabela 1 – Principais trabalhos desenvolvidos utilizando robôs contínuos

1.2.3.4. Vantagens fornecidas pelos robôs contínuos

É importante destacar as diferenças entre robôs com características contínuas dos robôs hiper-redundantes. Normalmente robôs hiper-redundantes são definidos como tendo um maior número de graus de liberdade atuados do que graus de liberdade de seu espaço de trabalho. Robôs contínuos não se enquadram nessa definição, pois podem exibir um grande número de graus de liberdade, mas nem todos esses graus de liberdade precisam ser diretamente acionados, conseqüentemente, é possível construir robôs contínuos que não sejam classificados como hiper-redundantes.

Diferentemente de manipuladores contínuos, os manipuladores convencionais utilizam conexões seriais com articulações diretamente acionadas. Um simples exemplo dessa desvantagem é dado quando o robô precisa vencer um obstáculo, como mostra a Figura 26 [33]. O manipulador discreto precisa prover atuação em suas três juntas para conseguir ultrapassar o obstáculo, enquanto o robô contínuo precisa de apenas um atuador. Seguindo o mesmo conceito, os manipuladores hiper-redundantes do tipo serpente resultam em robôs extremamente complexos e difíceis de implementar. O uso de robôs do tipo contínuo pode simplificar a arquitetura de manipuladores convencionais.

Figura 26 – Exemplo de obstáculo a) Robô discreto b) Robô Contínuo

Ao analisar os trabalhos propostos anteriormente observa-se que os robôs contínuos são mais leves, e consequentemente podem ser portáteis, possuem mecanismos mais simplificados, controle menos complexo devido ao menor número de atuadores e podem interagir com obstáculos encontrados em seu ambiente sem criar grandes forças de contato. Ao utilizar configurações extrínsecas, ou seja, ao posicionar os atuadores fora da estrutura do robô, e transmitindo o movimento utilizando cabos é possível construir robôs com alta isolamento elétrica o que é de grande utilidade para operações que envolvem tarefas nas proximidades de redes elétricas de alta tensão. Outra vantagem encontrada consiste no fato de que ao não possuírem juntas, os robôs contínuos apresentam elevada repetibilidade de posicionamento, visto que o posicionamento é o resultado da deformação elástica da estrutura. Em resumo, pode-se afirmar que ao analisar as vantagens oferecidas pela arquitetura contínua percebe-se que os robôs contínuos são mais adequados para tarefas a alturas elevadas.

1.3. Objetivos

Através desta parte inicial do trabalho, foi identificada uma classe importante de tarefas a serem executadas por robôs: a manipulação de ferramentas em locais elevados. Em seguida, através de um estudo crítico sobre as variedades de robôs existentes, identificou-se os robôs contínuos como sendo a melhor solução a ser aplicada. Neste momento dos estudos, estabelecem-se como objetivos:

- Propor um robô contínuo para manipulação de ferramentas em locais elevados. Esta proposta inclui: um mecanismo que permita atingir diferentes posições em alturas elevadas, um mecanismo para o seu acionamento e a estratégia de controle. O problema de manipulação é simplificado e neste trabalho será considerado somente o problema de posicionamento em posições elevadas.
- Realizar um estudo de caso que trata de um problema real de manuseio de ferramenta em local elevado, sendo que aqui será realizado todo o desenvolvimento e detalhamento da solução de modo a validar o robô proposto.

1.4. Metodologia

Primeiramente foi identificada uma classe de tarefas, que consiste em manipular ferramentas a alturas elevadas, a qual existe a possibilidade e o interesse de aplicar dispositivos robóticos. Ao fazer um estudo para classificar e selecionar o tipo de robô mais indicado para efetuar tais tarefas, percebeu-se qual a classe mais adequada de robô a ser utilizado.

Tendo definido o tipo de robô a ser utilizado, foi feita uma revisão bibliográfica, com a qual foi possível analisar os meios de acionamento e as principais arquiteturas do tipo de robô escolhido. Já em uma segunda etapa, será proposta uma nova arquitetura para robô contínuo que lhe permita atingir locais a alturas elevadas e serão propostos mecanismos que realizam tanto o acionamento quanto a estabilização do robô. Tendo elaborado os modelos teóricos, será adotado um estudo de caso para aplicar os conhecimentos desenvolvidos.

Em uma terceira etapa serão levantadas as necessidades de trabalho do robô e será iniciada a fase de projeto. Nesta fase serão feitos o projeto mecânico e a análise estrutural do robô. Tendo elaborado o projeto, será iniciada a construção do protótipo e após concluir a fabricação, serão efetuados testes para avaliá-lo. Ao analisar o comportamento do robô serão propostas e implementadas melhorias, e os resultados obtidos serão analisados.

2. Proposta de solução

Ao analisar os robôs contínuos propostos por diversos autores, é possível notar que o volume de trabalho desses robôs é limitado, já que está diretamente relacionado com a capacidade que cada robô tem de deformar a própria estrutura em regime elástico. Em atividades onde se almeja um volume de trabalho maior, como por exemplo, manipular ferramentas a grandes alturas é necessário fazer com que o robô possua um grande comprimento para que suas deformações sejam capazes de atender as especificações de trabalho.

Levando em conta as dificuldades de transporte que estruturas de grande comprimento possuem e que muitos dos locais a serem inspecionados se localizam em lugares de difícil acesso, chega-se a conclusão que é necessário utilizar robôs que possuam dimensões reduzidas. É proposta então a utilização de mecanismos telescópicos, pois ao utilizá-los é possível obter um aumento significativo no volume de trabalho e ao mesmo tempo simular uma estrutura continua.

Com o intuito de explicar o princípio de funcionamento da arquitetura proposta, o texto a seguir é dividido em duas seções:

- Sistema Mecânico: Nesta seção será proposta uma nova arquitetura de robô contínuo que mais se adequa a manipular ferramentas em alturas elevadas. Também será feita a análise da estrutura de maneira a estudar a instabilidade desta e, finalmente, propor um sistema de acionamento que seja capaz de manter a estrutura estável e ao mesmo tempo acionar o robô.
- Sistema de Controle: Nesta seção será proposto um modelo dinâmico do sistema em um grau de liberdade que utiliza os dados obtidos na análise dinâmica da estrutura. Também será definida a estratégia de controle utilizada neste trabalho. Com isso este trabalho deixara aberto um caminho para o desenvolvimento de uma estratégia de controle que considera a dinâmica do sistema. Neste trabalho será considerada uma

estratégia de controle que leva em conta somente o modelo estático o que será suficiente em operações em baixas velocidades. Será ainda neste trabalho demonstrada a viabilidade de execução de controle em malha aberta.

2.1. Sistema mecânico

2.1.1. Arquitetura telescópica

Mecanismos telescópicos são formados por um conjunto de perfis normalmente tubulares que possuem diâmetros diferentes e seqüenciais. São montados de maneira seqüencial onde os tubos de diâmetro menor são montados dentro dos que possuem diâmetro maior como ilustra a Figura 27 [63].

Figura 27– Mecanismo telescópico retraído [63]

Ao utilizar um mecanismo telescópico é possível variar o comprimento da estrutura sem deformá-la, o que gera um aumento significativo no volume de trabalho dos robôs do tipo contínuo. Apesar de ter partes móveis, a estrutura telescópica é capaz de simular uma estrutura continua mesmo quando o robô não utiliza seu comprimento máximo. Como ilustrado na Figura 28, o princípio de funcionamento de estruturas telescópicas consiste basicamente em acionar o primeiro estágio que se desloca até atingir o fim de curso, situação 1, após esse momento o segundo estágio entra em movimento até chegar ao seu fim de curso, e assim sucessivamente.

Figura 28– Princípio de funcionamento de um mecanismo telescópico

Esse conceito pode ser expandido para diversos estágios e consequentemente alcançar alturas das mais variadas, porém ao aumentar o comprimento da estrutura a seção transversal dos estágios começa a ser demasiadamente pequena em relação ao comprimento da estrutura, ou seja, a estrutura se torna cada vez mais esbelta, tornando o projeto mais complexo. Ao trabalhar com estruturas esbeltas e de grande comprimento é importante realizar uma análise estrutural para entender como a estrutura irá se comportar, como será visto na próxima seção.

2.1.1.1. Análise estrutural estática

2.1.1.1.1. Introdução

Robôs contínuos são formados por estruturas de natureza contínua, ou seja, seu comportamento pode ser definido nos infinitos pontos que formam o contínuo, gerando sistemas com infinitos graus de liberdade. Para uma análise rigorosa de tais estruturas é necessário integrar as equações diferenciais que expressam o equilíbrio de um elemento infinitesimal genérico das mesmas.

A integração analítica das equações de equilíbrio é com frequência difícil, ou impossível, devido à geometria da estrutura, natureza das condições de contorno, propriedades dos materiais, o tipo de carga e etc. Por isso se faz necessário utilizar métodos simplificados que permitam analisar a estrutura de maneira aproximada. Neste trabalho será utilizado o método dos elementos finitos (MEF) que é um dos procedimentos que existem para aproximar o comportamento de uma estrutura com infinitos graus de liberdade por outra com aproximadamente as mesmas propriedades físicas e geométricas. Porém com um número finito de graus de liberdade cujas equações de equilíbrio podem expressar-se por um sistema algébrico de equações simultâneas com um número limitado de incógnitas [64][65].

2.1.1.1.2. Proposta de elemento finito

Ao modelar uma estrutura utilizando o método dos elementos finitos é muito importante escolher o elemento finito adequado, em termos de suas definições como geometria, graus de liberdade de seus nós, funções de interpolação, física do problema em questão, entre outros. Com isso se procura simular a realidade com menos perda de acurácia possível.

Ao analisar a estrutura de robôs contínuos esbeltos, observa-se que é possível reproduzir a estrutura utilizando elementos de pórtico espacial, que é formulado por um modelo de viga com seção transversal arbitrária, o qual pode deformar não apenas na direção axial, mas também nas direções perpendiculares ao eixo da viga. O elemento de pórtico espacial é capaz de

suportar forças tanto nas direções axiais e transversais assim como momentos. Um elemento de pórtico espacial possui 6 graus de liberdade por nó, dos quais 3 representam as translações nos eixos x,y,z, e três rotações em torno dos respectivos eixos x,y e z. Entretanto, como um elemento de pórtico possui no mínimo 2 nós, cada elemento possui 12 graus de liberdade, como demonstrado na Figura 29 [66].

Figura 29 – Elemento de pórtico espacial

Onde o vetor de deslocamentos pode ser dado por:

$$\mathbf{d}_e = \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \\ d_7 \\ d_8 \\ d_9 \\ d_{10} \\ d_{11} \\ d_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ \theta_{z1} \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \theta_{x2} \\ \theta_{y2} \\ \theta_{z2} \end{Bmatrix} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Deslocamento das} \\ \text{componentes do nó 1} \\ \\ \\ \text{Deslocamento das} \\ \text{componentes do nó 2} \end{array} \right\} \quad (1)$$

A matriz de rigidez do elemento pode ser obtida analisando os esforços no elemento ao aplicar um deslocamento unitário em cada um dos graus de liberdade [67], e pode ser escrita como:

$$\mathbf{k}_e = \begin{bmatrix}
\uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow \\
\frac{AE}{2a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{AE}{2a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \frac{3EI_z}{2a^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{3EI_z}{2a^2} & 0 & -\frac{3EI_z}{2a^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{3EI_z}{2a^2} \\
0 & 0 & \frac{3EI_y}{2a^3} & 0 & -\frac{3EI_y}{2a^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{3EI_y}{2a^3} & 0 & -\frac{3EI_y}{2a^2} & 0 \\
0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{2a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{2a} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_y}{a} & 0 & 0 & 0 & \frac{3EI_y}{2a^2} & 0 & \frac{EI_y}{a} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{a} & 0 & -\frac{3EI_z}{2a^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{EI_z}{a} \\
-\frac{AE}{2a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{AE}{2a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -\frac{3EI_z}{2a^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3EI_z}{2a^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{3EI_z}{2a^2} \\
0 & 0 & -\frac{3EI_y}{2a^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3EI_y}{2a^3} & 0 & \frac{3EI_y}{2a^2} & 0 \\
-\frac{GJ}{2a} & 0 & 0 & \frac{GJ}{2a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{2a} & 0 & 0 \\
0 & \frac{EI_y}{a} & 0 & 0 & \frac{EI_y}{a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_y}{a} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EI_z}{a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{a}
\end{bmatrix}$$

Simétrica

(2)

Onde A é a área da seção transversal, a é o comprimento, E é o módulo de elasticidade, I_y e I_z são os momentos de inércia das seções transversais do elemento de pórtico em relação aos eixos y e z respectivamente, G é o módulo de elasticidade transversal e J é momento de inércia polar da seção transversal do elemento [67]. Já a matriz de massa é dada por:

$$\mathbf{m}_e = \frac{\rho A a}{105} \begin{bmatrix}
70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 35 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 78 & 0 & 0 & 0 & 22a & 0 & 27 & 0 & 0 & 0 & -13a \\
0 & 0 & 78 & 0 & -22a & 0 & 0 & 0 & 27 & 0 & 13a & 0 \\
0 & 0 & 0 & 70r_x^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -35r_x^2 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 8a^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6a^2 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8a^2 & 0 & 13a & 0 & 0 & 0 & -6a^2 \\
35 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 27 & 0 & 0 & 0 & 13a & 0 & 78 & 0 & 0 & 0 & -22a \\
0 & 0 & 27 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 78 & 0 & 22a & 0 \\
0 & 0 & 0 & -35r_x^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70r_x^2 & 0 & 0 \\
0 & -6a^2 & 0 & 0 & -6a^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8a^2 & 0 \\
0 & -6a^2 & 0 & 0 & 0 & -6a^2 & 0 & -22a & 0 & 0 & 0 & 8a^2
\end{bmatrix}$$

Simétrica

(3)

Onde $r_x^2 = \frac{I_x}{A}$, sendo I_x o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo x do elemento de pórtico.

2.1.1.1.3. Análise Estática Linear

Na formulação de elementos finitos, o corpo elástico contínuo é representado por um sistema discreto, formado por um conjunto de elementos estruturais unidos entre si através de um número finito de pontos denominados nós do modelo. Um elemento estrutural é definido como uma parte do corpo elástico e o seu comportamento é determinado a partir do conhecimento dos deslocamentos ou forças nodais deste elemento.

O conhecimento do comportamento dos elementos individuais permite representar o comportamento do sistema como um todo de acordo com a teoria de elementos finitos [69][70]. As matrizes de massa e rigidez da estrutura denominadas de matrizes globais são montadas a partir das matrizes elementares de massa e rigidez estimadas individualmente para cada elemento. As matrizes globais representam n equações diferenciais, sendo n o número de graus de liberdade do modelo discreto [70].

Para obter um modelo matemático da estrutura real, é necessário utilizar uma matriz de conectividade para definir como os elementos estarão conectados. Como se pode observar na Figura 30, os elementos estão conectados em série, e em uma primeira análise, cada elemento pode ser entendido como uma variação de rigidez da estrutura. Ao ser constituída de tubos de diversos diâmetros existe uma variação significativa entre a rigidez dos tubos e a rigidez das buchas intermediárias que, como comentado anteriormente fazem o contato entre os tubos de maior e menor diâmetro de maneira a que um deslize dentro do outro.

Figura 30– Conectividade de uma estrutura telescópica

Após realizar a numeração dos graus de liberdade, é possível montar as matriz de rigidez global e a matriz de massa global, que são as matrizes que descrevem a rigidez e a massa da estrutura levando em conta a participação de todos os elementos acima definidos. Para montar as matrizes globais é necessário levar em conta a relação de forças entre os elementos e as leis de equilíbrio e compatibilidade, características que estão definidas na matriz de conectividade.

Também é preciso estabelecer um novo sistema de coordenadas, já que as coordenadas de cada elemento não são necessariamente iguais às coordenadas do sistema da estrutura, ou seja, as coordenadas locais podem ser diferentes das coordenadas globais. Ao adotar um novo sistema de coordenadas observa-se que cada grau de liberdade sofre uma rotação, como ilustrado na Figura 31, para realizar a transformação de um sistema para outro é utilizada uma matriz de transformação de coordenadas. A matriz de transformação é facilmente encontrada ao generalizar as rotações sofridas pelo elemento ao passar das coordenadas locais para as globais [66] . Uma importante propriedade da matriz de transformação de coordenadas é a

ortogonalidade, ou seja, a transposta da matriz coincida com sua inversa, fato permite obter facilmente a relação entre a matriz de coordenadas locais e globais.

Figura 31– Sistema de coordenadas globais do elemento de pórtico [66]

As coordenadas do sistema global estão expressas em letras maiúsculas e o sistema local em letras minúsculas. A matriz de rigidez dos elementos sofre alteração uma vez que se muda a orientação dos elementos, para isso deve-se realizar as seguintes operações [66]:

$$K_e = T^T k_e T \quad (4)$$

$$M_e = T^T m_e T \quad (5)$$

$$F_e = T^T f_e \quad (6)$$

Onde K_e , M_e e F_e são as matrizes de rigidez e massa e o vetor de carregamento em coordenadas globais, e k_e , m_e e f_e são as matrizes de rigidez e massa e o vetor de carregamento nas coordenadas locais, respectivamente. Tendo a matriz de transformação em função dos ângulos de

rotação, aplicam-se as rotações de maneira a fazer com que a estrutura fique na vertical.

Ao possuir a matriz de rigidez global aplica-se a relação mostrada na Equação 7:

$$\{F\} = [K]\{u\} \quad (7)$$

Onde F representa o vetor de carregamentos, K a matriz de rigidez e u o vetor de deslocamentos. Assim é possível determinar o gradiente de deformações da estrutura ou as forças necessárias para provocar uma determinada deformação.

2.1.1.1.4. Análise estrutural dinâmica

Estruturas contínuas podem ser representadas por sistemas de parâmetros distribuídos, ou seja, propriedades como massa e rigidez variam de acordo com o comprimento. Em um primeiro estudo, foi feita uma aproximação na qual um sistema de infinitos graus de liberdade é aproximado por sistema de um grau de liberdade. Para realizar essa aproximação de forma analítica é necessário adotar que a estrutura se deformará sempre com a mesma forma. Assim sendo, a forma da estrutura deformada é aproximada por uma função de interpolação expressa pela letra φ . Ao adotar uma função de interpolação é possível obter as propriedades generalizadas do sistema, ou seja, como a rigidez do sistema e a massa do sistema irão se comportar quando a estrutura estiver sujeita a carregamentos dinâmicos [72][73]. Para uma barra de seção constante e parâmetros distribuídos, ilustrada na Figura 32, temos as seguintes equações que representam a massa e a rigidez generalizadas [72]:

$$m^* = \int_0^L m(x) \varphi^2 dx \quad (8)$$

$$k^* = \int_0^L EI(x) \ddot{\varphi}^2 dx \quad (9)$$

Figura 32– Pórtico engastado de seção constante

Com o objetivo obter a equação de movimento do sistema é necessário adotar uma função de interpolação que defina como será a deformação da estrutura. Uma vez que o comportamento dinâmico estrutural de sistemas mecânicos pode ser descrito por seus parâmetros modais, ou seja, suas frequências naturais, constante modal e razões de amortecimento. A análise modal é um procedimento bastante eficaz para determinar esses parâmetros e a literatura mostra que essa técnica vem conquistando uma ampla gama de aplicação. A análise modal empregada para investigar o comportamento dinâmico de uma estrutura é sustentada em três hipóteses básicas [74][75]:

- Linearidade do comportamento dinâmico: a resposta da estrutura para uma combinação de forças aplicadas simultaneamente é equivalente à soma das respostas de cada força atuando individualmente;
- Invariável no tempo: os parâmetros físicos da estrutura são constantes;
- Observável: a relação entrada/saída medida contém informações suficientes para determinar o comportamento dinâmico do modelo.

Portanto para determinar a função de interpolação, é necessário determinar os modos de vibração da estrutura, sendo que a equação que descreve as vibrações ao longo de um pórtico de seção constante é dada por [72][73]:

$$\Psi(x,t) = y(x).sen(\omega.t) \quad (10)$$

Onde a solução da equação diferencial é a amplitude $y(x)$ da vibração dos pontos x da barra e pode ser escrita por

$$y(x) = A_1 \sinh(qx) + A_2 \cosh(qx) + A_3 \sin(qx) + A_4 \cos(qx) \quad (11)$$

Aplicando as condições de contorno determina-se a frequência natural do sistema que pode ser expressa por [72][73]:

$$\omega_n = r_n^2 \sqrt{\frac{E * I}{\rho * A * L^4}} \quad (12)$$

Onde f_n é a frequência do modo normal n de vibração, A é a área da seção transversal, L o comprimento, E o módulo de elasticidade e I o momento de inércia, e os valores das raízes $r_n = q_n L$, da Equação (10), são calculadas pelo procedimento numérico do ponto médio, seus primeiros valores são $r_n = 1.875, 4.693, 7.855, 10.996$ [72]. A amplitude $y(x)$ dos distintos pontos x da barra no modo normal é definida pela equação [72]:

$$y_n(x) = \left\{ (\sinh(q_n x) - \sin(q_n x)) - \frac{(\sinh(q_n L) - \sin(q_n L))}{(\cosh(q_n L) - \cos(q_n L))} \cdot (\cosh(q_n x) - \cos(q_n x)) \right\} \quad (13)$$

Conforme os resultados obtidos no programa apresentado no apêndice E é possível obter os primeiros modos de vibração do pórtico em questão, como ilustrado na Figura 33. O primeiro modo possui uma amplitude maior que os demais e ao analisar o comportamento dinâmico da estrutura observa-se que o primeiro modo é predominante quando uma estrutura de grande comprimento esta em vibração livre.

Figura 33– Três primeiros modos de vibrar de uma viga engastada de seção constante

Com isso pode-se aproximar a função de interpolação φ pela equação que define a amplitude dos distintos pontos x da barra no primeiro modo normal, e com isso obter a massa e a rigidez generalizada como mostrado a seguir:

$$m^* = \int_0^L m(x) \left\{ (\sinh(q_1 x) - \cosh(q_1 x)) - \frac{(\sinh(q_1 L) - \cosh(q_1 L))}{(\cosh(q_1 L) - \cosh(q_1 L))} \cdot (\cosh(q_1 x) - \cosh(q_1 L)) \right\}^2 dx \quad (14)$$

$$k^* = \int_0^L EI(x) \left\{ (\sinh(q_1 x) - \cosh(q_1 x)) - \frac{(\sinh(q_1 L) - \cosh(q_1 L))}{(\cosh(q_1 L) - \cosh(q_1 L))} \cdot (\cosh(q_1 x) - \cosh(q_1 L)) \right\}^2 dx \quad (15)$$

Ao analisar as equações (14) e (15) observa-se que mesmo para um caso simplificado, como um pórtico de seção contínua, as equações diferenciais que regem o sistema possuem diversas variáveis e são de difícil resolução, o que torna inviável estudar sistemas multi-seção analiticamente devido à complexidade das equações e ao número de variáveis envolvidas nos processos de integração.

Entretanto estruturas lineares podem ser representadas por modelos matemáticos lineares obtidos a partir da discretização da estrutura em elementos conectados rigidamente por nós, assim como já foi feito na análise estática. A interação entre as forças dos vários elementos que constituem a estrutura é representada por forças resultantes dos esforços de flexão, torção e tração atuando nesses nós [76]. Tal procedimento permite realizar a análise modal de sistemas mais complexos, como no caso do robôs contínuos telescópicos que são estruturas que possuem diversas seções.

2.1.1.1.4.1. Análise Modal utilizando o Método dos Elementos Finitos

Como já dito anteriormente, as matrizes de massa e rigidez da estrutura, denominadas de matrizes globais, são montadas a partir das matrizes elementares de massa e rigidez estimadas individualmente para cada elemento. As matrizes globais representam n equações diferenciais, sendo n o número de graus de liberdade do modelo discreto. A equação diferencial algébrica que expressa o equilíbrio das forças de um sistema de vários graus de liberdade é utilizada para a representação de uma estrutura por elementos finitos. Essa abordagem leva a um modelo discreto da estrutura, representado por um sistema linear de n equações diferenciais de segunda ordem acopladas. Na forma matricial tem-se [72][73]:

$$[M]\left\{\ddot{x}(t)\right\}+[C]\left\{\dot{x}(t)\right\}+[K]\left\{x(t)\right\}=\{f(t)\} \quad (16)$$

Onde

$\left\{\ddot{x}(t)\right\}, \left\{\dot{x}(t)\right\}$ e $\left\{x(t)\right\}$ - são os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento respectivamente.

$\{f(t)\}$ - é a força aplicada ao sistema.

$[M], [C]$ e $[K]$ são matrizes de massa, amortecimento e rigidez, respectivamente

Para estudar os modos de vibração natural podem-se desconsiderar os efeitos do amortecimento, a Equação (16) torna-se:

$$[M]\left\{\ddot{x}(t)\right\} + [K]\left\{x(t)\right\} = \{f(t)\} \quad (17)$$

Assumindo uma força de excitação do tipo $\{f(t)\} = \{F\}e^{i\omega t}$ e uma solução da forma $\{x(t)\} = \{X\}e^{i\omega t}$, a equação do movimento pode ser expressa por:

$$(-\omega^2[M] + [K])\{X\}e^{i\omega t} = \{F\}e^{i\omega t} \quad (18)$$

Onde ω é a frequência de oscilação da força, $\{F\}$ é o vetor de constante complexas da força de excitação e $\{X\}$ é o vetor de constantes complexas da resposta.

De qualquer forma, a solução numérica da Equação (18) não é simples devido às dificuldades computacionais, particularmente para sistemas de alta ordem. Para certos casos especiais, uma maneira apropriada de resolver o sistema é utilizar a análise modal. Este processo requer a solução do problema de autovalor do sistema e a resposta da estrutura é expressa como uma combinação linear dos autovetores [77].

Para uma estrutura não amortecida, a equação homogênea associada com a equação do movimento pode ser escrita assumindo que as forças de excitação são nulas. A resposta do sistema neste caso pode ser obtida considerando a solução homogênea a partir de um problema de autovalor Equação (19) [70].

$$(-\omega^2[M] + [K])\{X\}e^{i\omega t} = 0 \quad (19)$$

A solução não trivial da Equação (19) conforme discutida em Meirovitch [77], é dada por uma matriz diagonal $[\lambda_r]$, para $r = 1, \dots, n$, chamada de matriz

dos autovalores, e está associada a uma outra matriz $[\Psi]$ de ordem $n \times n$, chamada de matriz de autovetores. Particularmente, cada $\lambda_r = \omega_r^2$ está relacionado a um vetor deslocamento $\{\psi\}_r$ [78]. Na dinâmica estrutural, os autovalores e os autovetores são interpretados como as frequências naturais e os modos próprios de vibrar, respectivamente, portanto, o problema de autovalor pode ser expresso por:

$$[K]\{\psi\}_r = \lambda_r [M]\{\psi\}_r \quad (20)$$

A solução computacional do problema de autovalor é bem conhecida e existem vários métodos de resolução bastante utilizados [70]. Vale ressaltar que neste tipo de problema, quando a matriz $[M]$ é simétrica, positiva definida e a matriz $[K]$ é simétrica e semi-definida positiva, os autovalores são reais e não negativos. Para o caso de uma estrutura na condição livre-livre, a solução admite autovalores nulos associados aos autovetores representando os modos de corpo rígido, ou seja, o corpo livre pode movimentar-se numa frequência nula sem se deformar [79].

Uma das propriedades mais importantes dos modos próprios é a ortogonalidade em relação as matrizes de massa e rigidez, sua dedução pode ser verificada detalhadamente em Meirovitch [78]. A propriedade de ortogonalidade é de grande utilidade e convenientemente aplicada na solução de problemas de autovalor em elementos finitos, além de ser frequentemente utilizada para desacoplar as equações de movimento do sistema, transformando as matrizes de massa e rigidez da estrutura em matrizes de massa e rigidez modal:

$$[\Psi]^T [M] [\Psi] = [m^*] \quad (21)$$

$$[\Psi]^T [K] [\Psi] = [k^*] \quad (22)$$

Onde $[\Psi]$ é a matriz modal que contém os vetores modais, $[m^*]$ é a matriz de massa modal, e $[k^*]$ a matriz de rigidez modal. É importante ressaltar que tanto a matriz de massa modal como a matriz de rigidez modal são matrizes

diagonais, onde cada elemento da matriz representa a massa generalizada e a rigidez generalizada para um determinado modo [80]. Quando os modos são normalizados em relação à massa modal, as propriedades de ortogonalidade são chamadas de ortonormais e passam a satisfazer as seguintes relações:

$$[\phi]^T [M] [\phi] = [I] \quad (23)$$

$$[\phi]^T [K] [\phi] = [\lambda] \quad (24)$$

Onde $[\phi] = \frac{\{\psi\}_r}{[m_r]}$ é a matriz modal normalizada em relação à massa, $[I]$ é a matriz identidade e $[\lambda]$ é a matriz dos autovalores.

É importante notar que, outro aspecto de interesse das propriedades de ortogonalidade dos autovetores é a sua utilização na transformação das coordenadas físicas do modelo em coordenadas modais, que permite o desacoplamento das equações diferenciais do movimento. Isto possibilita resolver as equações do movimento como se fosse um sistema de um grau de liberdade para cada equação e depois retornar ao sistema físico [80].

A representação do modelo em coordenadas modais pode ser obtida pré-multiplicando a Equação (18) pela matriz modal transposta $[\Psi]^T$ e pós-multiplicando pela identidade. O sistema de equações do movimento é então desacoplado, Equação (25).

$$-\omega^2 [m^*] [\Psi]^{-1} \{X\} + [k^*] [\Psi]^{-1} \{X\} = \{\mathfrak{F}\} \quad (25)$$

A Equação (25) permite representar o sistema como n sistemas de um grau de liberdade, onde $\{\mathfrak{F}\} = [\Psi]^T \{F\}$ é o vetor força em coordenadas modais. Neste caso, o vetor deslocamento $\{q\}$ em coordenadas modais é dado pela expressão (26).

$$\{q\} = [\Psi]^{-1} \{X\} \quad (26)$$

Pré-multiplicando a Equação (26) pela matriz modal obtém-se novamente o vetor deslocamento em coordenadas espaciais $\{X\}$, Equação (27).

$$\{X\} = [\Psi] \{q\} \quad (27)$$

A Equação (27) mostra que os deslocamentos físicos do modelo podem ser escritos como uma combinação das colunas da matriz modal escalonados pelo vetor modal [81].

2.1.1.1.4.2. Modelo dinâmico de um grau de liberdade

Ao realizar a análise modal da estrutura é possível obter modelos dinâmicos levando em consideração quais os modos de vibrar mais influentes na dinâmica da estrutura, tais modelos podem ser utilizados ao estudar a dinâmica da estrutura e conseqüentemente serem aplicados a teorias de controle.

A utilização da transformação das coordenadas físicas do modelo em coordenadas modais, permite o desacoplamento das equações diferenciais do movimento. Isto possibilita resolver as equações do movimento como se fosse um sistema de um grau de liberdade para cada equação e depois retornar ao sistema físico. O que permite modelar o sistema dinâmico de um grau de liberdade como sendo um sistema massa-mola-amortecedor (MMA), como ilustrado na Figura 34, onde os valores de rigidez e massa são os valores generalizados para o primeiro modo de vibração.

Figura 34– Sistema MMA com massa, amortecimento e rigidez generalizadas

2.1.1.1.5. Análise estática não linear

Ao possuir uma estrutura continua, flexível, esbelta e de grande comprimento, os robôs contínuos que utilizem estruturas telescópicas de grande comprimento possuem um comportamento não linear, ainda que constituído de um material que obedeça à lei de Hooke. Para valores relativamente grandes de deslocamentos, a deflexão lateral de um membro pode trazer como consequência, o aparecimento de momentos fletores adicionais, denominadas de segunda ordem, em virtude da presença de um esforço normal, tais momentos fazem a estrutura fletir. A flambagem seria outra forma de instabilidade, contudo antes que a estrutura flambe os momentos fletores gerados pelos carregamentos de segunda ordem fazem com que a estrutura se flexione. A esse tipo de comportamento não-linear, dá-se o nome de não-linearidade geométrica, onde os efeitos não lineares estão associados às equações de equilíbrio, que consideram a configuração deformada, e as relações deformação/ deslocamento.

Ao consultar a norma estrutural NBR 6118 observa-se a importância de estudar efeitos de segunda ordem já que a norma exige o cálculo dos efeitos de segunda ordem toda vez que os esforços de segunda ordem forem superiores a mais de 10% dos de primeira ordem.

2.1.1.1.5.1. Método P-Delta

Com o intuito de levar em consideração a não linearidade geométrica da estrutura na análise pelo método dos elementos finitos, pode-se utilizar um procedimento numérico chamado P-Delta, o qual tem como princípio simular o efeito não linear através de cargas horizontais fictícias aplicadas a estrutura, como ilustrado na Figura 35 [82]. Sob efeito das cargas horizontais, os nós da estrutura deslocam-se horizontalmente, fazendo com que os elementos de pórtico espacial assumam uma outra configuração geométrica, que é a de nós deslocados.

Figura 35– Método P-Delta

Este processo é feito iterativamente, pesquisando a posição final da estrutura deformada. Os esforços solicitantes, forças normais, momentos fletores e esforços cortantes, calculados com a estrutura indeformada produzem esforços de 1ª ordem. Os mais importantes, são os momentos fletores nas extremidades da estrutura, considerando que, devido às cargas horizontais, a estrutura assumiu a configuração deslocada, como mostrado na ilustração acima, as cargas normais acrescentam aos momentos de 1ª ordem uma força que é dada por:

$$H = \frac{N \cdot \delta}{L} \quad (28)$$

O acréscimo nos momentos de 1ª ordem é acompanhado de novo deslocamento horizontal, o que torna o processo iterativo, onde os deslocamentos são cada vez menores, obtendo-se o equilíbrio da estrutura [83].

2.1.1.1.5.2. Instabilidade de estruturas esbeltas

Ao aplicar o método iterativo P-Delta a robôs contínuos de grande comprimento, onde o peso da estrutura é muito superior à grandeza dos esforços envolvidos nos efeitos de primeira ordem, observa-se que dependendo do material a estrutura pode colapsar com o próprio peso, já que a cada interação do método são gerados deslocamentos cada vez maiores, que tendem ao infinito à medida que se aumenta o número de interações. Este comportamento da estrutura pode ser visto experimentalmente, porém não aparece na análise linear já que a mesma considera todos os carregamentos na vertical como se estivesse apenas comprimindo a estrutura.

Com o objetivo de encontrar soluções para este problema foram estudadas estruturas contínuas e esbeltas e percebeu-se que a perda de estabilidade devido ao peso é comum em torres estaiadas, e a maneira mais usual de estabilizar a estrutura consiste em utilizar cabos tracionadores, chamados de estais, que exercem uma pré-carga na estrutura, como mostrado na Figura 36.

Figura 36- Modelo de torre estaiada

As configurações mais comuns de torres estaiadas são mostradas na Figura 37, e ao analisá-las é possível perceber que é possível utilizar a configuração (b) juntamente com o mecanismo telescópico já proposto de maneira a obter um robô contínuo telescópico estruturalmente estável.

Figura 37- Configurações usuais de torres estaiadas

2.1.1.2. Mecanismo de atuação e estabilização da estrutura

Utilizando estais para manter a estrutura em uma posição de equilíbrio, observa-se que unindo o conceito de utilização de estais ao conceito de atuação extrínseca de robôs contínuos, pode-se utilizar o mesmo cabo tracionador para fornecer estabilidade ao robô e ao mesmo tempo para acionar a estrutura de maneira extrínseca, ou seja, ao posicionar os atuadores na base do robô e tracionar um estai mais que os outros, a estrutura se deforma até as posições desejadas.

Para que a estrutura seja acionada e ao mesmo tempo não perca a estabilidade é necessário aplicar uma pré-carga e garantir que ao puxar um estai, o que se localiza antagonicamente ao mesmo deve ser afrouxado na mesma proporção, como ilustrado na Figura 38.

Figura 38– Princípio de funcionamento do mecanismo de atuação

Ao puxar o ponto P de maneira a deformar a estrutura, é possível fazer com que a estrutura permaneça estável mesmo em uma posição intermediária, como mostrado na Figura 39.

Figura 39 – Estabilidade do robô em posições intermediárias

Ao considerar as características telescópicas da estrutura, é necessário levar em conta que, ao variar o comprimento da estrutura a mola que estabelece a pré-carga deve ser capaz de se deformar de tal forma a sempre tracionar os cabos, mesmo que a estrutura telescópica esteja totalmente

retraída. Para isso, pode-se utilizar um tambor, que pode ser considerado como uma mola de torção que possua uma capacidade de realizar grandes deformações, e consequentemente enrolar os estais, como mostrado na Figura 40.

Figura 40 – Princípio de funcionamento do mecanismo auxiliar para estrutura telescópica

Ao ser acionado um dos estais, o mesmo estará exercendo uma força com o objetivo de deformar a estrutura enquanto o outro será tracionado pela estrutura e sustentará o peso da mesma. Com isso chega-se a um mecanismo auxiliar que permite estabilizar e acionar a estrutura telescópica.

2.2. Sistema de Controle

Com o intuito de estabelecer uma estratégia de controle, com a qual seja possível demonstrar o funcionamento do robô ao realizar testes experimentais, foram feitas algumas considerações. Primeiramente foi levado em consideração o princípio de funcionamento dos robôs contínuos, cujos movimentos são baseados exclusivamente na deformação elástica de uma estrutura central, espera-se que o processo de movimentação da extremidade do robô mediante acionamento dos estais apresente elevada repetibilidade.

Levando em consideração a ausência de juntas, mesmo para os robôs contínuos de pequeno comprimento existe uma grande dificuldade de medição da deformação da ponta [12]. Para o robô proposto se torna uma tarefa ainda mais complexa. Para fazer a medição da ponta da estrutura é possível utilizar câmeras que obtenham imagens sobre a estrutura e através da análise dessas imagens seria possível saber a deformação da estrutura, porém tal método é complexo e foge ao escopo deste trabalho. Outra maneira de tentar realizar a medição das deformações seria fazer a análise dos deslocamentos dos estais e determinar a posição da estrutura por relações geométricas, porém acredita-se que tal procedimento apresente erros muito elevados.

Distúrbios e efeitos dinâmicos da estrutura também são desconsiderados, tal aproximação permite analisar a estrutura sob um ponto de vista estático, com o qual é possível comprovar que a arquitetura atende as aplicações propostas.

Adotando as considerações acima, pretende-se assegurar a precisão de posicionamento segundo uma estratégia de controle em malha aberta. Porém, apesar deste trabalho não se destinar a realizar o modelamento dinâmico do sistema, foi feita a formulação um modelo dinâmico com o intuito de fornecer um ponto de partida para futuros trabalhos. No modelo apresentado são levados em consideração os modos mais importantes de vibração natural da estrutura e o mecanismo de acionamento é representado por uma constante obtida em testes experimentais.

2.2.1. Modelagem da planta em malha aberta

A planta do sistema de controle do robô contínuo proposto pode ser dividida em três blocos, como mostrado na Figura 41. O primeiro deles é o motor DC que recebe sinal elétrico e o transforma em rotação. O mecanismo é acionado e conseqüentemente traciona os estais deformando a estrutura.

Figura 41– Diagrama de blocos da planta do sistema de controle

2.2.1.1. Modelo Matemático do Motor CC

O modelo matemático de um motor DC pode ser aproximado pela seguinte função de transferência:

$$\frac{\theta(s)}{V_f(s)} = \frac{K_m}{s(Js + b)(L_f s + R_f)} \quad (28)$$

Onde K_m é uma constante do motor CC dado em N.m/A , J é a inércia do motor em N.m.s²/rad , L_f é a indutância em H e R_f é a resistência em Ω [84].

2.2.1.2. Função de transferência da estrutura

O modelo dinâmico da estrutura pode ser aproximado por um modelo de um grau de liberdade representado por um sistema massa, mola e amortecedor, sistema de segunda ordem. Ao aplicar a transformada de Laplace à equação 16, é possível obter a função de transferência da estrutura no domínio da frequência, que pode ser escrita como [84]:

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{(s + (b^*/m^*))(y_0)}{s^2 + (b^*/m^*)s + (k^*/m^*)} = \frac{(s + 2\xi\omega_n)(y_0)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (29)$$

2.2.1.3. Função de transferência da planta

Assim a função de transferência que rege a planta do sistema pode ser escrita da seguinte forma:

$$G(s) = \frac{K_m}{s(Js + b)(L_f s + R_f)} \cdot K_{mec} \cdot \frac{(s + 2\xi\omega_n)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (30)$$

Onde K_{mec} é a constante do mecanismo de acionamento utilizado para realizar o acionamento da estrutura.

3. Estudo de caso

Neste capítulo será realizado um estudo de caso visando demonstrar a eficácia da solução proposta no capítulo anterior, que consiste na utilização de robô contínuo para realizar tarefas a alturas elevadas. Primeiramente é apresentada uma introdução à inspeção de cruzetas de madeira, que é o objeto adotado no estudo de caso escolhido, depois são levantadas as necessidades de projeto e apresentados o projeto mecânico e o projeto e o controle do robô contínuo telescópico proposto.

3.1. Introdução ao estudo de caso

As redes de distribuição de energia elétrica são formadas por um grande número de sistemas que podem ser agrupados em cinco diferentes grupos, como listados a seguir:

- Linhas de alta tensão;
- Linhas de média tensão;
- Linhas de baixa tensão;
- Subestações para redução da tensão;

Em meio a um sistema tão vasto e complexo é fácil imaginar a quantidade de componentes e partes que podem apresentar problemas, e, levando em conta que este sistema de distribuição fornece energia para indústrias e hospitais, pode-se concluir que é necessário ter um planejamento bem definido de como realizar a manutenção do sistema, já que um simples curto circuito pode apenas deixar uma residência sem luz por algumas horas como originar um prejuízo extremamente alto a uma indústria ou até mesmo colocar em risco o funcionamento de diversos equipamentos em um hospital [85].

A manutenção das redes de distribuição é realizada de acordo com critérios que organizam as atividades de manutenção, objetivando à obtenção do máximo rendimento do sistema de distribuição a menores custos e dentro dos padrões de qualidade e segurança requeridos. Dentre esses critérios pode-

se citar a importância da localidade, número de consumidores, consumo industrial, densidade de carga e dimensão da área.

Dependendo do tipo de sistema e dos componentes a serem avaliados, a manutenção pode ser corretiva, preventiva ou preditiva. Os procedimentos de manutenção e inspeção são na maioria dos casos de alto risco, pois envolvem operações próximas a altas tensões, uso de diversos equipamentos de segurança, equipes especializadas e em muitas vezes os lugares são de difícil acesso. As ferramentas usadas nessas tarefas ainda são em sua maioria mecânicas e exigem esforço físico, longos períodos de trabalho e geram altos riscos de acidente [86].

Em uma rotina de manutenção de uma linha de distribuição de baixa tensão são checados os seguintes itens: cabos, postes, cruzetas, ferragens, isoladores, condutores, conexões, aterramento, haste e cabo-guarda, pára-raios, chave fusível e chave faca, transformadores, regulador, chave a óleo, religador, seccionador, capacitores, afastamentos mínimos, ramais de serviço, iluminação pública, faixa de servidão, seccionamento das cercas e chave remota. Obviamente para cada um dos itens citados acima existe um procedimento específico de como realizar a inspeção e a manutenção.

As cruzetas são inspecionadas visualmente e tem vital importância em uma linha de transmissão. A inspeção de cruzetas consiste em checar o nível, ou seja, observar se estão inclinadas ou deslocadas em relação à posição normal e checar se a cruzeta apresenta queimaduras extensas de raios, rachaduras, lascas ou sinais de apodrecimento, aparecimento das ferragens ou deformação da estrutura para cruzetas de concreto. A inspeção é feita visualmente e sem a elevação do eletricitista, ou seja, o eletricitista permanece no solo e observa a cruzeta com a utilização de um binóculo. Este procedimento é pouco eficaz já que a maior parte das vezes as rachaduras ou os sinais de apodrecimento se localizam na parte superior da cruzeta impedindo ao eletricitista de observá-los. Com isso surge a necessidade de otimizar a maneira com a qual é feita a inspeção das cruzetas.

3.2. Identificação das necessidades

Para realizar a inspeção de cruzetas de maneira mais eficaz se sugere o uso de uma câmera fotográfica que seja acoplada à extremidade livre de um robô do tipo contínuo que seja capaz de elevar e posicionar a câmera na altura e posição desejada. Como mostra a Figura 42, as cruzetas se localizam a uma altura de 9m, possuem até 3m de comprimento e suportam o peso de isoladores e cabos condutores que transmitem eletricidade a uma tensão de 12 kV.

Figura 42– Dimensões principais de um poste de transmissão

Com isso observa-se a necessidade de propor uma estrutura que seja composta por materiais dielétricos e flexíveis. A utilização de uma estrutura contínua se torna mais adequada, pois diversos cabos podem estar posicionados ao redor do poste sem seguir qualquer tipo de padronização, como mostrado na Figura 43. Caso haja contato com algum cabo a estrutura se deformará e gerando baixas forças de contato, e evitando acidentes.

Figura 43– Área de difícil acesso a ser inspecionada

Como as redes de distribuição se localizam não só em regiões urbanas, mas também em regiões rurais, o robô deve possuir baixo peso e ser de fácil portabilidade, sendo possível ser transportado sem a utilização de veículos.

3.3. Projeto mecânico

Analisando as necessidades previamente mencionadas, chega-se a conclusão que a estrutura deve ser leve, ser de fácil transporte, ter isolamento elétrica e a amplitude de suas deformações devem ser grandes o bastante para fotografar a cruzeta e obter o máximo de detalhes sobre seu estado. Considerando que as câmeras atuais já possuem diversos tipos de resolução e assumindo que o comprimento máximo de uma cruzeta pode chegar a 3 metros, considera-se que o robô proposto deva possuir uma amplitude de deformação em sua extremidade livre de entre 0,7 a 1,5m em um determinado sentido, sendo assim a deformação em um plano seria de 1,4 a 3m, dependendo da deformação máxima do robô, a câmera utilizada poderia utilizar mais ou menos recursos como zoom para realizar a inspeção com sucesso.

Analisando as necessidades encontradas foram pesquisados diversos materiais, dentre eles destacam-se o aço carbono, alumínio, materiais compósitos (fibra de vidro e fibra de carbono) e o PVC (cloreto de polivinila).

A solução mais imediata de material é o aço carbono que é um material de elevado módulo de elasticidade e resistência mecânica além de ser um material usualmente empregado em construções mecânicas apresentando um baixo custo. Comparado ao aço carbono, o alumínio e os materiais compósitos são mais interessantes por possibilitarem a obtenção de soluções equivalentes sob o ponto de vista de resistência mecânica, mas de peso mais reduzido. Apesar das vantagens do aço e do alumínio, o PVC foi escolhido para a implementação do robô contínuo, uma vez que os tubos de PVC, utilizados em diversas aplicações, são facilmente encontrados no mercado em variados diâmetros, além de serem de fácil usinagem.

Tais tubos apresentam elevada tolerância dimensional – variação de diâmetro ao longo do comprimento da ordem de centésimos de milímetro, o que é um quesito importante na implementação de um mecanismo telescópico que é o elemento mecânico central do robô contínuo proposto neste trabalho. A obtenção de tubos de outros materiais que não o PVC e com precisão comparável a estes tubos comerciais de PVC, implicaria num custo muito maior. Tal custo não se justifica neste caso, pois o objetivo maior aqui é a validação da arquitetura de robô contínuo que foi proposta no capítulo anterior. Além do que, para este estudo caso, as cargas envolvidas são reduzidas, não se questiona a velocidade com que o robô realiza as suas tarefas e portanto, não se exige uma elevada rigidez da estrutura mecânica.

Há consciência de que o PVC não é material ideal a ser utilizado em robô contínuo, oferecendo certas dificuldades. Como será visto mais adiante, a estrutura telescópica em PVC pode se tornar instável, se deformando continuamente devido ao seu peso próprio, como mostrado teoricamente na figura 39, e experimentalmente na Figura 44. Tal instabilidade poderia ser contornada mediante dimensionamento adequado do diâmetro e espessura de parede dos tubos de PVC empregados. Mas isto é difícil, uma vez que está se optando pelo uso de tubos comercialmente disponíveis. Contorna-se o problema através do uso de mecanismos auxiliares, que no caso, são os estais.

Figura 44– Estrutura telescópica esbelta instável

Em uma primeira versão, projetada para atingir uma altura de 9m, foram utilizados quatro tubos de PVC, com os diâmetros de tamanho comercial, indicados na tabela 2. Os tubos foram numerados de acordo com seu diâmetro, sendo que os de maior diâmetro foram numerados primeiro, cada tubo possui 2,6 m de comprimento o que resulta em um total de 9 m, dentre os quais 0,35m ficam distribuídos ao longo das juntas de maneira a evitar travamentos.

Tubo nº:	Diâmetro Externo (mm)	Diâmetro Interno (mm)	Comprimento (m)
1	50,0	44,0	2,6
2	39,9	35,1	2,6
3	32,0	27,0	2,6
4	16,3	12,7	2,6

Tabela 2 – Propriedades geométricas dos tubos utilizados

Porém, como já dito anteriormente, ao adotar uma estrutura esbelta e de baixa rigidez surgem grandes deformações geradas pelo próprio peso. Para solucionar esse problema foram utilizados estais, que minimizam as deformações, dando a estabilidade à estrutura ao aplicar uma pré-carga, Figura 45.

Figura 45– Estabilização da estrutura por meio de estais.

3.3.1. Análise estrutural do estudo de caso

Com o intuito de analisar o comportamento da estrutura ao ser submetida a carregamentos, é feita uma análise estrutural utilizando o método dos elementos finitos. Em uma primeira etapa são feitas as simulações lineares para obter as forças que os atuadores deveriam efetuar para que a estrutura se deforme e atenda as necessidades de projeto. Em seguida é feita uma análise dinâmica da estrutura, utilizando o método de superposição modal, que permite obter um modelo dinâmico de um grau de liberdade que pode ser utilizado em futuros estudos, para o modelamento dinâmico da estrutura e a elaboração do algoritmo de controle em malha fechada.

Em uma segunda etapa são analisados os efeitos não lineares que surgem ao utilizar uma estrutura esbelta de grande comprimento. Em uma terceira etapa é feita a análise não linear para descobrir a força que os atuadores deveriam efetuar levando em conta os efeitos de não linearidade geométrica da estrutura.

3.3.1.1. Implementação em ferramenta computacional

Em seu desenvolvimento, o Método de Elementos Finitos requer a recorrência de diversas matrizes em suas etapas preliminares. Como já explicado anteriormente, o procedimento de rigidez direta permite a obtenção de uma matriz de rigidez global, a partir de matrizes elementares por meio de procedimentos de manipulação matricial. Neste estudo, utilizou-se a ferramenta comercial MATLAB. Esta é plenamente adequada para as operações necessárias, além de possuir facilidades para o armazenamento de informações, por meio de vetores e matrizes indexadas. Neste trabalho foram feitas análises estáticas lineares, não lineares e dinâmicas, porém para diminuir o tempo de simulação, os programas foram separados de maneira que todos utilizam como base os mesmos dados de entrada, com isso podemos dividir os programas desenvolvidos como ilustrado na Figura 46.

Figura 46– Fluxograma de funcionamento dos programas desenvolvidos

Onde o programa chamado “Dados de entrada” tem como função coletar todos os dados de entrada sobre as características geométricas e propriedades dos materiais da estrutura, e seu código fonte esta disponível no Apêndice A, o

programa “Matrizes Globais” define o elemento de pórtico espacial nas coordenadas locais, e manipula as matrizes de forma a montar a matriz global de rigidez e de massa da estrutura, o código fonte esta disponível no Apêndice B. Já os demais programas, como o próprio nome indica, são os responsáveis por efetuar as análises estática linear, não linear e dinâmica e estão disponíveis nos apêndices C, D e E respectivamente.

3.3.1.2. Análise Estática Linear

3.3.1.2.1. Geração da Malha

Para realizar a análise estrutural foi levada em conta a condição crítica de trabalho do robô, ou seja, quando o robô estiver operando em fim de curso, com um comprimento efetivo de aproximadamente 9 m. Em uma primeira análise é possível discretizar a estrutura em 7 elementos de rigidez diferente, como ilustra a Figura 47, onde os elementos 1,3,5,7 são tubos e os elementos 2,4,6 são as buchas que possuem menor comprimento e rigidez significativamente mais elevada.

Figura 47– Discretização da estrutura

É importante ressaltar que o número de elementos utilizados na análise influencia diretamente o resultado da mesma [68]. Levando tal fato em consideração, primeiramente foram identificados os elementos principais que formam a estrutura, para, em uma segunda análise, se discutir o número de elementos que a estrutura deve possuir de forma que a resposta seja a mais acurada possível com o menor custo computacional, para isso foi adotado um carregamento unitário no grau de liberdade na direção x do último elemento livre, e aplicar a relação dada na Equação (5), como ilustrado na Figura 48.

Figura 48 – Deformação da estrutura ao aplicar uma carga unitária (Apêndice C)

Com o intuito de estudar a discretização necessária da estrutura pode-se de maneira interativa aumentar o número de elementos e comparar a resposta do sistema, como ilustrado na Figura 49.

Figura 49– Análise da resposta em relação a discretização da estrutura (Apêndice C)

Ao analisar as simulações, observa-se que não há mudança do valor do deslocamento mesmo após discretizar o sistema em mais de 500 elementos, o que sugere que a discretização inicial em 7 elementos já é suficiente para realizar a análise da estrutura.

Condições de contorno não homogêneas

Aplicar condições não homogêneas a estrutura consiste em aplicar um deslocamento a um dos nós livres da estrutura e descobrir a força que deveria ser exercida na estrutura para que esse deslocamento fosse alcançado. No caso do robô contínuo, o deslocamento desejado é de 1,5 metros, como ilustrado na Figura 50 [65][71].

Figura 50– Aplicando condições de contorno não homogêneas à estrutura

Para resolver o problema de condições de contorno não homogêneas se aplica uma deformação Δ no grau de liberdade desejado e são zeradas todas as linhas e colunas da matriz de rigidez que influenciam este nó. Portanto, dada uma matriz de rigidez $K_{n \times n}$ temos que :

$$\begin{bmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} & 0 & K_{1,i} & K_{1,(i+1)} & K_{1,n} \\ K_{2,1} & K_{2,2} & 0 & K_{2,i} & K_{2,(i+1)} & K_{2,n} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ K_{i,1} & K_{i,2} & 0 & K_{i,i} & K_{i,(i+1)} & K_{i,n} \\ K_{(i+1),1} & K_{(i+1),2} & 0 & K_{(i+1),i} & K_{(i+1),(i+1)} & K_{(i+1),n} \\ K_{n,1} & K_{n,2} & 0 & K_{n,i} & K_{n,(i+1)} & K_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_i \\ u_{(i+1)} \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 - (u_1 * K_{\delta,1}) \\ F_2 - (u_2 * K_{\delta,2}) \\ 1,5 \\ F_i - (u_i * K_{\delta,i}) \\ F_{(i+1)} - (u_{(i+1)} * K_{\delta,(i+1)}) \\ F_n - (u_n * K_{\delta,n}) \end{bmatrix} \quad (31)$$

Ao compensar o vetor de deslocamentos com os coeficientes de rigidez que foram anulados na matriz de rigidez $K_{n \times n}$, descobre-se a força necessária aplicada ao grau de liberdade escolhido para gerar deslocamento Δ [65][71].

Ao realizar as simulações, obtêm-se que para fazer com que a estrutura se deforme 1,5m é necessário que os atuadores apliquem uma força $F = 0,8531\text{N}$ na direção x, como mostrado na Figura 51. É importante ressaltar que na análise linear, os esforços normais a estrutura, ou seja os esforços na direção z, são considerados como sendo esforços que promovem apenas a tração ou compressão da estrutura.

Neste caso, como a estrutura é submetida a grandes deformações, sendo assim as forças normais à estrutura serão responsáveis por deslocamentos também na direção x, como será visto mais adiante na análise não linear.

Figura 51– Estrutura deformada ao aplicar $\Delta = 1,5$ metros (Apêndice C)

3.3.1.3. Análise Dinâmica em um grau de liberdade

A análise dinâmica da estrutura proposta neste trabalho tem por objetivo formular um modelo matemático da dinâmica da estrutura, de base para futuros trabalhos que visem estudar as características dinâmicas da arquitetura proposta. Conforme será discutido adiante, neste trabalho será considerado somente o comportamento estático do sistema.

Ao utilizar o programa disponível no Apêndice E, é possível construir modelos com diversos graus de liberdade, que levam em consideração os principais modos de vibração da estrutura. Para comprovar seu funcionamento, nesta seção é demonstrada a análise em um grau de liberdade considerando o modo de vibração mais influente como sendo o primeiro modo natural de vibração.

Ao analisar o comportamento dinâmico do robô para o primeiro modo de vibração, como ilustrado na Figura 52, programa disponível no apêndice G, é possível modelar o sistema como sendo um modelo simplificado de grau de liberdade. No sistema massa, mola, amortecedor de um grau de liberdade os valores de rigidez e massa são os valores generalizados para o primeiro modo de vibração.

Figura 52– Primeiro modo de vibrar da estrutura (Apêndice E)

Ao efetuar a simulação obtém-se os valores $k^*=0.6$ e $m^*=2.2$ e ao adotar um coeficiente de amortecimento $\xi = 0,05$ temos um amortecimento aproximado $c^* = 0,0575$, que como dito anteriormente, podem ser utilizados em um modelo MMA.

3.3.1.4. Análise estática não linear

Para realizar a análise não linear da estrutura foi utilizado o método P-Delta, que como já comentado anteriormente é um método iterativo. Assim sendo nesta seção primeiramente é definido o número de interações para que seja possível obter resultados estáveis para depois em uma segunda etapa ser analisada a estrutura proposta.

3.3.1.4.1. Definição do número de interações

Para que a análise não linear tenha resultados estáveis é necessário realizar diversas interações até que a resposta converja para um valor específico. Para tal foi feita uma análise utilizando uma carga unitária na direção vertical (z) e uma carga de 0,1 na direção horizontal (x).

Número de interações	Deslocamentos em x (m)						
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6	Nó 7
1	0,0053	0,0058	0,0263	0,0276	0,0694	0,0718	0,1758
2	0,0064	0,0069	0,0314	0,0330	0,0830	0,0858	0,2102
3	0,0066	0,0072	0,0324	0,0341	0,0856	0,0885	0,2169
4	0,0066	0,0072	0,0326	0,0343	0,0861	0,0891	0,2182
5	0,0066	0,0072	0,0326	0,0343	0,0862	0,0892	0,2185
7	0,0066	0,0072	0,0326	0,0343	0,0863	0,0892	0,2185
15	0,0066	0,0072	0,0326	0,0343	0,0863	0,0892	0,2185
25	0,0066	0,0072	0,0326	0,0343	0,0863	0,0892	0,2185
50	0,0066	0,0072	0,0326	0,0343	0,0863	0,0892	0,2185

Tabela 3 – Definição do número de interações para o processo P-delta

Como mostrado na tabela 4, a partir de 7 interações o valor do deslocamento não sofre mais nenhuma alteração. É importante perceber que o valor dos nós que estão mais próximos da base da estrutura estabilizam primeiro, já que a medida que o número de interações aumenta o momento gerado pela carga H diminui, e como o braço dessa força fictícia em relação à base é menor, não possuem mais influencia significativa na análise.

Os resultados obtidos mostram que ao levar em consideração os efeitos de segunda ordem, ocorre uma variação significativa da resposta, pois o deslocamento do último nó foi de 0,17858m a 0,21850m para um mesmo carregamento, o que representa um erro percentual de 18%.

3.3.1.4.2. Análise estática não linear do estudo de caso

Os efeitos de segunda ordem são causados por cargas que agem na direção axial da estrutura, e no caso do robô contínuo, o peso próprio da estrutura é muito superior à grandeza dos esforços envolvidos para acionar o robô como já foi visto na análise estática linear.

Foram feitas simulações com diferentes materiais, no caso foram utilizados Aço, Alumínio e PVC. As simulações consistem basicamente utilizar a estrutura proposta, aplicar o carregamento indicado na Figura 53, e utilizando o método P-Delta estudar como a estrutura se comporta levando em consideração o peso da mesma.

Figura 53- Simulação de estabilidade aplicada a diferentes materiais

Os materiais apresentam relações entre densidade e rigidez bem diferenciadas. Primeiramente foi feita a simulação utilizando aço como material estrutural e como mostra a Figura 54, a deformação se estabiliza em aproximadamente 0,0162m após 8 interações.

Figura 54- Simulação utilizando Aço

Em uma segunda análise foi feito o mesmo teste porém utilizando como material estrutural o alumínio, e como mostrado na Figura 55, ao ser um material menos rígido, o número de interações é maior, aproximadamente 12 interações até que o resultado convirja para o valor final que é de aproximadamente 0,0539m.

Figura 55- Simulação utilizando Aluminio

Por último foi feita a simulação adotando o PVC como material estrutural, dentre os materiais escolhidos nota-se que o PVC é o material mais flexível e a proporção entre o peso e a rigidez faz com que ele colapse, já que após algumas iterações os resultados de deformação se tornam incoerentes, como demonstrado na Figura 56. Isso ocorre devido ao fato que o modelo matemático de elemento finito adotado considera que o corpo seja infinitamente elástico, e ao analisar tais deformações é possível concluir que a estrutura colapsaria com o próprio peso.

Figura 56 – Simulação utilizando PVC

Ao realizar as simulações, observa-se que mesmo as estruturas mais rígidas se estabilizam em configurações deformadas, ou seja, o próprio peso da estrutura faz com que a mesma saia da posição central, considerada inicial, e se estabilize em uma segunda posição. Surge então a necessidade de utilizar mecanismos auxiliares para estabilizar a estrutura mesmo nas mais rígidas.

Levando em consideração que os mecanismos de estabilização irão neutralizar o peso da estrutura, foi feita uma segunda simulação não linear, desprezando o peso da estrutura. Com isso é possível levantar os esforços que os atuadores devem promover para deformar a estrutura e atender as especificações de trabalho, levando em consideração os efeitos de segunda ordem ignorados na análise linear.

Ao utilizar um mecanismo de acionamento extrínseco preso à base do robô é preciso considerar que a força exercida pelo mesmo terá uma componente na vertical com módulo maior do que a componente na horizontal, como ilustrado na Figura 57.

Figura 57– Decomposição das forças geradas pelo mecanismo de acionamento

Ao analisar as dimensões da estrutura, já apresentadas anteriormente e disponíveis no Apêndice A, obtemos $\beta = 3.2^\circ$ o que nos fornece que a componente na vertical pode ser escrita em função do cosseno de β e a componente na horizontal, em relação ao seno. Ou seja, a componente na vertical será 17,1477 vezes maior que a componente na horizontal.

Com isso observa-se a necessidade de reavaliar a força aplicada à estrutura, pois ao aplicar a força de acionamento de 0,8531N, determinada na análise linear, obtem-se deformações muito maiores do que as desejadas. A força adequada é determinada por um processo iterativo onde a força aplicada à estrutura é diminuída gradativamente até se chegar à deformação desejada de 1,5m. Chegou-se assim à conclusão de que para se alcançar as deformações desejadas, a força F_x deve ser de 0,2600 N, como ilustra a Figura 58.

Figura 58 – Deformação da estrutura devido ao processo iterativo P-Delta (Apêndice D)

A simulação não linear mostra que ao se utilizar uma estrutura muito flexível, pequenas cargas provocam descolamentos de grande amplitude, o que pode ser considerado como uma vantagem para este caso, pois assim sendo, é possível utilizar atuadores para menores esforços, minimizando o peso da estrutura.

3.3.2. Mecanismos Propostos

3.3.2.1. Mecanismo de recolhimento e controle de tensão nos estais

Como já dito anteriormente, ao utilizar estais para estabilizar a estrutura e fazer com que o robô permaneça em uma posição central, considerada como inicial, é necessário utilizar um mecanismo que faz com que a estrutura se estabilize não só em seu comprimento máximo, mas também em alturas intermediárias. Ou seja, um mecanismo que permite alterar o comprimento dos estais mas mantém uma mesma força de tensionamento nos mesmos. O princípio de funcionamento do mecanismo consiste em utilizar um tambor para enrolar ou soltar os estais sendo acionado por um motor elétrico que dependendo da leitura dos sensores faz com que o mecanismo aplique uma tensão maior ou menor nos estais. O mecanismo é composto por dois sensores, que definem a posição final e inicial da alavanca responsável por aplicar a pré carga a estrutura e um carretel, que é acionado por um motor DC, que enrola os estais aplicando uma pré-carga à estrutura, como mostrado na Figura 59.

Figura 59 – Mecanismo de recolhimento e controle de tensão nos estais

O princípio de funcionamento do mecanismo consiste basicamente em fazer com que a mola exerça uma força na alavanca, que faz com que a mesma gire e tracione os estais. Caso a estrutura esteja aumentando seu comprimento a força nos estais irá aumentar fazendo com que a alavanca acione o sensor 1, quando isso acontece o motor gira no sentido anti-horário e libera os estais, até atingir a posição de equilíbrio novamente.

Caso os estais fiquem frouxos, ou seja, caso a estrutura esteja diminuindo seu comprimento, a mola faz com que a roldana acione o sensor 2 que faz com que o carretel enrole os estais até que eles comecem a exercer uma força maior que a da mola e faça com que a alavanca fique em uma posição intermediária, na qual exerce uma pré carga na estrutura, como ilustrado na Figura 60

Figura 60 – Principais componentes do mecanismo de recolhimento e controle de tensão nos estais

Ao analisar o funcionamento do mecanismo de estabilização observa-se que ao utilizar a configuração de estais proposta anteriormente, os estais funcionam adequadamente para pequenas deformações, como mostrado na figura, porém desde que a estrutura não seja submetida a grandes deformações. Quando submetido a grandes deformações um dos estais pode cruzar a linha elástica da estrutura como mostrado na Figura 61, e se isso ocorrer não é possível fazer com que a estrutura volte à posição inicial, pois mesmo afrouxando um dos estais e tracionando o outro a estrutura sempre

tenderá a se deformar cada vez mais. Para solucionar esse problema basta utilizar um espaçador que guie os estais e não deixe que eles cruzem a linha elástica da estrutura.

Figura 61 – Utilização de espaçadores para grandes deformações

Pode-se concluir que ao utilizar espaçadores o robô contínuo telescópico proposto maximiza seu volume de trabalho e os esforços gerados pelos atuadores diminuem uma vez que o ângulo β , ilustrado anteriormente na Figura 57, aumenta. Juntamente com essas modificações é proposta a utilização de estais secundários, mostrado na Figura 62, para aumentar a pré-carga no primeiro estágio, caso seja necessário aumentar a rigidez da estrutura telescópica, já que uma pequena deformação ou desalinhamento no primeiro estágio implica em um grande deslocamento da ponta do robô.

Figura 62–Robô contínuo telescópico proposto utilizando espaçadores

3.3.2.2. Mecanismo de Içamento

Ao possuir uma estrutura telescópica é necessário fazer com que a estrutura se estenda do seu comprimento mínimo para o máximo. Para isso, é necessário um sistema de polias e cabos que ao serem acionados por um motor elétrico façam com que a estrutura varie seu comprimento.

O mecanismo desenvolvido, chamado de mecanismo de içamento, pode ser dividido em duas partes. A primeira delas, chamada de mecanismo superior, se localiza na extremidade superior de cada um dos tubos, com exceção do tubo 4, e é presa externamente aos tubos como mostrado nas Figura 63 e 64. O mecanismo superior consiste basicamente de duas peças,

um fim de curso mecânico, chamado de fim de curso superior e uma tampa que é presa à extremidade do tubo e que tem a finalidade de acomodar uma polia para guiar o cabo de içamento, que irá transmitir o movimento entre os tubos.

Figura 63—Ilustração do mecanismo de içamento superior

Figura 64- Mecanismo de içamento superior

Já o mecanismo inferior é composto por um fim de curso inferior e um suporte para acomodar uma polia que guia o cabo de içamento, como mostrado na Figura 65.

Figura 65—Mecanismo de içamento inferior

Como demonstrado na Figura 65, o cabo de içamento passa pelas polias tanto do mecanismo inferior como do superior de todos os tubos. Com isso, ao fixar uma das extremidades do cabo e tracionar a outra é possível movimentar os tubos, como ilustrado Figura 66. Ao fixar a extremidade superior do cabo ao tubo 4 e tracionar a outra extremidade ocorre um estiramento do cabo e consequentemente o tubo 4 se movimenta verticalmente em relação ao tubo 3. Ao atingir o fim de curso, o tubo 3 começa a subir em relação ao tubo 2 e assim sucessivamente até atingir o comprimento máximo.

Figura 66–Mecanismo de içamento – princípio de funcionamento

Ao utilizar mecanismos telescópicos é necessário levar em consideração fatores como folgas e o atrito entre os tubos. No protótipo, aplicou-se uma camada de parafina em torno dos tubos, o que fez com que a força necessária para realizar o içamento diminua significativamente. As folgas foram minimizadas na fabricação e na montagem e mantidas o suficiente para não impedir um deslizamento suave entre os tubos do mecanismo telescópico.

3.3.2.3. Mecanismo de Acionamento

De modo a possibilitar o posicionamento da extremidade superior do robô em duas direções ortogonais num plano horizontal, foi desenvolvido um mecanismo que traciona os estais fazendo com que a estrutura se deforme e atinja as posições desejadas, como ilustrado na Figura 67. A rigor, a trajetória percorrida pela extremidade da estrutura é curvilínea, mas dado que o comprimento da estrutura é muito grande em relação ao deslocamento, a trajetória é muito próxima de retilínea.

O mecanismo utiliza apenas um atuador e movimenta a estrutura em sentidos opostos em um mesmo plano, pois como detalhado anteriormente, o mecanismo tensiona o estai preso a um lado da estrutura e ao mesmo tempo afrouxa o estai que está preso ao outro lado da estrutura, assim sendo é possível deformar no sentido que é aplicado o deslocamento.

Figura 67–Ilustração do funcionamento do mecanismo de acionamento

Para fazer com que a estrutura se deforme em dois planos perpendiculares são utilizados 2 mecanismo, onde cada um controla o movimento da extremidade livre do robô em um plano, como mostrado na Figura 68.

Figura 68—Ilustração do mecanismo de acionamento para 2 planos

O mecanismo, ilustrado na Figura 69, é basicamente constituído por um motor CC que gira um fuso. Conforme previsto na análise estrutural a força dos mecanismos deveria ser inferior a 0,26 N, e como o mecanismo proposto utiliza um fuso para amplificar a força promovida pelos motores CC adota-se que o esforço obtido foi superior a 0,26 N.

O fuso movimenta uma mesa guiada por uma rampa de acionamento. Quando a roda de acionamento atrelado à mesa se encontra na posição neutra, a garra fica aberta, permitindo que os estais que por ela passam se movimentem livremente com relação à mesa. Ao se acionar o motor, a mesa se movimenta e a roda de acionamento sai de sua posição neutra, sobe pela rampa e passa a ser forçada para o lado direito da figura. Isto faz com que a garra se feche prendendo os estais à mesa.

A partir deste momento, os estais passam a deslocar juntamente com a mesa. Os dois estais, um disposto em cada lado da estrutura, passa pelo interior do mecanismo. O estai de um lado da estrutura entra no mecanismo pela sua parte superior. Já o estai do outro lado, entra pela parte inferior do mecanismo. Desta forma, ao se movimentar a mesa, o estai de um lado da

estrutura é tracionada enquanto o estai do outro lado é afrouxada. Dois deste mecanismo são instalados, cada um para movimentar a estrutura numa direção.

Figura 69– Princípio de funcionamento do mecanismo de acionamento

Foram desenvolvidos e testados dois modelos de garra. O primeiro modelo consiste basicamente de uma chapa de alumínio dobrada e ranhurada. Quando a mesa móvel sai de posição neutra, a roda de acionamento é deslocada, fazendo com que a chapa prenda os estais contra a parede da mesa. Foram colocadas molas entre a roda e a chapa de alumínio de modo a se absorver imperfeições dimensionais na rampa de acionamento, como ilustrado na Figura 70.

Figura 70– Princípio de funcionamento da primeira garra proposta

Como será discutido posteriormente, o primeiro modelo de garra apresentou problemas práticos e foi desenvolvido um segundo modelo, com o intuito de aumentar a força de pinçamento e evitar travamentos devido a desalinhamentos e folgas presentes no mecanismo. No segundo modelo, a roda de acionamento prensa os estais contra as bordas de num canal, promovendo uma força de pinçamento muito maior, como ilustrado na Figura 71.

Figura 71– Princípio de funcionamento da segunda garra proposta

Em ambos os casos, foi necessário instalar guias para que os estais não se cruzem e estejam sempre na mesma posição, como ilustrado na Figura 72.

Figura 72 – Utilização de guias para os estais no mecanismo de acionamento

3.3.2.3.1. Modelamento do mecanismo de acionamento

Com o intuito conhecer o curso necessário no mecanismo de acionamento da figura 69 para se ter um deslocamento mínimo de 1,5m na extremidade do robô, foi realizado um teste que consiste basicamente em tensionar os estais manualmente até se atingir o deslocamento especificado em projeto. O comprimento do estai recolhido é o curso necessário no mecanismo de acionamento, vide Figura 73. Este teste foi repetido 10 vezes e os valores obtidos em cada teste estão listados na Tabela 5. O valor médio foi de 0,071m.

Figura 73– Experimento para determinar a constante do mecanismo

Medição nº:	Valor Medido
1	0,065 m
2	0,070 m
3	0,075 m
4	0,080 m
5	0,070 m
6	0,060 m
7	0,075 m
8	0,065 m
9	0,070 m
10	0,080 m
Valor Médio	0,071 m

Tabela 4 – Ensaio para obtenção do curso máximo do mecanismo de acionamento

3.4. Projeto de Controle

Conforme discutido no capítulo anterior, a dinâmica do sistema é desconsiderada e somente os efeitos estáticos são considerados neste trabalho. A estratégia de controle adotada foi seqüencial. Dada a natureza do robô aqui desenvolvido, cujos movimentos são baseados exclusivamente na deformação elástica de uma estrutura telescópica, espera-se que o processo de movimentação da extremidade do robô mediante acionamento dos estais apresente elevada repetibilidade. Desta forma, pretende-se assegurar a precisão de posicionamento segundo uma estratégia em malha aberta. Ou seja, numa primeira etapa de calibração, se elabora um mapa que relaciona o deslocamento de cada estai ao deslocamento na extremidade do robô. Ao se realizar um determinado posicionamento, consulta-se o mapa e determina-se o deslocamento necessário nos estais. Para efeitos práticos, o deslocamento dos estais são medidos de forma indireta pelo número de voltas completadas pelo fuso que aciona a mesa do mecanismo de acionamento.

Para implementar o controle foi utilizado um CLP que controla quantas voltas o fuso efetuou e conseqüentemente qual foi o deslocamento dos estais. O esquema de controle consiste basicamente em acionar o mecanismo através de um controle remoto que envia dados de entrada para o CLP, dependendo

do botão apertado o CLP comuta um dos relés da placa de relés, ilustrada na Figura 74.

Figura 74– Controle remoto, CLP e placa de relés

Ao ser acionado, o motor elétrico presente no mecanismo de acionamento faz com que a mesa móvel se movimente e consequentemente os estais sejam tracionados pelo mecanismo. Enquanto a estrutura se deforma, o CLP conta o número de voltas dadas pelo fuso, utilizando um encoder, e verifica se os sensores fim de curso estão ativados. Caso algum sensor de fim de curso seja acionado, o CLP interrompe a corrente nos motores e permite somente o movimento da mesa em direção à posição neutra, como ilustrado na Figura 75.

O mapa de posições mencionado anteriormente é armazenado na memória do CLP e é consultado pelo algoritmo de controle. Na operação manual do robô através do *joy stick*, o mapa de posições é consultado de modo que o CLP indique a posição atual da extremidade do robô. Já numa possível

operação automática, onde o operador entra com a posição desejada, o CLP obtém através do mapa o número de voltas do fuso necessárias em cada mecanismo de acionamento para se atingir a posição desejada. Em seguida aciona os motores dos dois mecanismos até se completar os números de voltas pré determinados.

Figura 75 – Esquema de controle em malha aberta

4. Testes experimentais e melhorias

Em uma primeira etapa, os testes tiveram o objetivo de avaliar a estabilidade da estrutura. A primeira bateria de testes consistia basicamente em estender o robô até seu comprimento máximo (9m), então os mecanismos são acionados até que o robô chegue a uma determinada posição, então é feito o mesmo posicionamento diversas vezes e é analisado o número de voltas que o fuso deu para alcançar aquela posição, como ilustrado na Figura 76.

Figura 76– Esquema do teste experimental

Nos primeiros ensaios notou-se uma grande dificuldade em fazer com que o robô retornasse à posição inicial (posição vertical). A estrutura se deformava devido ao efeito do peso próprio não retornando à posição inicial, mesmo que se diminuísse a tensão nos estais. Uma eventual solução para este problema seria a aplicação de uma pré-carga através dos estais. Mas isto não foi possível, pois o último estágio apresentava uma rigidez tão baixa que uma pré-carga fazia com que a mesma flambasse. Associado a estes problemas, observou-se também problemas de baixa resistência dos espaçadores. Ao submeter os estais a uma força maior de tracionamento, os espaçadores se deformavam.

Com o intuito de solucionar esse problema foram, realizadas algumas melhorias na estrutura do robô. Dentre as melhorias, foi eliminado o último estágio e foram substituídos os demais estágios de maneira a utilizar 3 estágios de aproximadamente 3,3m, como ilustrado na Figura 77.

Figura 77– Esquema do teste experimental

Em um segundo passo se aumentou a rigidez do último estágio, colando o tubo que anteriormente era o último estágio por dentro do terceiro estágio. Para aumentar a rigidez dos espaçadores foram construídas cruzeiras de madeira fixas

ao final de cada estágio intermediário que suportam os espaçadores, como ilustrado Figura 78.

Figura 78– Primeiras melhorias implementadas

Ao implementar as primeiras melhorias foi possível estabilizar a estrutura em uma posição inicial, por outro lado foi possível observar que os motores DC estavam sendo mais exigidos uma vez que a rigidez da estrutura aumentou e consequentemente a tensão e a deformação nos estais era maior.

Ao iniciar os testes notou-se uma grande dificuldade para medir o deslocamento da ponta do robô, para isso foi utilizada uma trena como escala de referência e um bastão como estrutura de referência, onde a trena foi estendida no telhado e foi utilizado o bastão como elo entre a trena e a ponta da estrutura. No procedimento de medição percebeu-se que havia uma grande dificuldade em manter o bastão a 90° com a escala de referência, como ilustrado na Figura 79.

Figura 79– Primeira bateria de testes

Apesar das imprecisões obtidas durante o processo de medição foi possível avaliar o comportamento da estrutura e obter os primeiros dados experimentais, durante a primeira bateria de testes foram feitos 120 posicionamentos, mais especificamente 60 posicionamentos com o mecanismo que controla o eixo x e 60 com o mecanismo que controla o eixo y. Os testes consistiam basicamente em deformar a estrutura dez vezes até 0,5m e medir o número de voltas no fuso, e assim sucessivamente para 1m e 1,5m.

A seguir são exibidos na Figura 80 os resultados obtidos ao testar um dos mecanismos. No gráfico exibido temos o número de voltas efetuadas pelo motor no eixo y, ou seja, quanto que a mesa móvel andou, e no eixo x são exibidos o número de medições efetuadas. Na legenda pode-se ver que cada

uma das linhas representa uma faixa de valores, onde foi adotado como valores positivos a deformação em um sentido e negativo no sentido oposto.

Figura 80– Resultados obtidos na primeira bateria de testes

Durante a coleta de dados foi possível observar que em algumas ocasiões a primeira garra desenvolvida não exercia uma força de pinçamento constante, permitindo com que os estais deslizassem durante o posicionamento, fazendo com que ocorressem erros de posicionamento, e que quando isso ocorria não era possível fazer com que a estrutura voltasse para a posição de origem. Assim era necessário manter a garra na posição neutra para liberar os estais e fazer com que a estrutura retornasse a posição inicial manualmente.

Tais problemas ocorreram devido à imprecisões na fabricação dos mecanismos, gerando assim desalinhamentos que faziam com que a garra, ilustrada na Figura 70, não conseguisse exercer uma força constante durante seu curso. Foram feitas diversas tentativas para aumentar a pressão exercida pela mola presente na garra e foi observado que ao fazer isso a força de pinçamento aumentava e o mecanismo travava, pois os motores não possuíam torque para fechar a garra.

Como mostrado na Figura 80, os erros de repetibilidade de posicionamento comprometem a repetibilidade do robô proposto, o que inviabilizaria a utilização de um mapa de posições para fazer o controle do robô em malha aberta.

Para resolver o problema foram feitas algumas alterações no mecanismo ao substituir a garra por um segundo modelo onde a força de atrito entre a garra e os estais é maior e consequentemente a força de pinçamento também é maior.

Também foi observado que o primeiro estágio estava empenado e ainda estava muito flexível, levando em conta que qualquer deformação presente no primeiro estágio resulta em um deslocamento amplificado na extremidade do robô, foram utilizados estais secundários, que são estais fixos presos a primeira cruz e a base que exercem uma pré-carga no primeiro estágio, aumentando sua rigidez estrutural e mantendo seu peso.

Ao analisar resultados obtidos na primeira bateria de testes é possível perceber que apesar dos erros de posicionamento a estrutura atende as necessidades, porém, com o intuito de melhorar os resultados, foram propostas uma segunda etapa de melhorias.

As principais melhorias implementadas, ilustradas na Figura 81, foram:

- a utilização de um segundo modelo de garra, ilustrado na figura 71;
- o aumento de comprimento do primeiro estágio para 3,5m e a diminuição do comprimento do último estágio para 3m;
- a utilização de estais secundários para aumentar a rigidez do primeiro estágio;
- a utilização de uma cruz intermediária para guiar os estais, pois com o aumento de rigidez da estrutura foi necessário também aumentar a rigidez dos espaçadores para que eles suportassem as forças envolvidas na nova configuração.

Figura 81– Segunda implementação de melhorias

Concluída a implementação da segunda etapa de melhorias foi realizada a segunda etapa de testes experimentais, porém, como já comentado anteriormente, durante a primeira bateria de testes, observou-se uma grande dificuldade em realizar as medições de forma precisa.

Com o intuito de melhorar a precisão de medição os procedimentos experimentais foram modificados. Assim como anteriormente, no segundo procedimento de teste se adotou que as rotações positivas são as rotações no sentido horário, e as rotações negativas no sentido anti-horário. Feitas essas considerações o procedimento consistiu em:

- fornecer +30 rotações ao motor do mecanismo de acionamento
- medir o deslocamento da ponta da estrutura
- fornecer +30 rotações ao motor do mecanismo de acionamento (ao todo o motor efetuou +60 rotações)
- medir o deslocamento da ponta da estrutura
- fornecer +60 rotações ao motor do mecanismo de acionamento (ao todo o motor efetuou +120 rotações)
- medir o deslocamento da ponta da estrutura
- fornecer -120 rotações ao motor do mecanismo de acionamento no sentido anti-horário
- analisar se a ponta da estrutura voltou a posição inicial
- caso a posição inicial não seja atingida ou for ultrapassada, mede-se a distância entre a posição inicial e a posição real que a ponta da estrutura alcançou
(essa medida é considerada como sendo +0 , pois a estrutura havia se deslocado primeiramente no sentido horário)
- fornecer -30 de rotações ao motor do mecanismo de acionamento
- medir o deslocamento da ponta da estrutura
- fornecer -30 rotações ao motor do mecanismo de acionamento (ao todo o motor efetuou -60 rotações)
- medir o deslocamento da ponta da estrutura
- fornecer -60 rotações ao motor do mecanismo de acionamento (ao todo o motor efetuou -120 rotações)
- medir o deslocamento da ponta da estrutura
- fornecer +120 rotações ao motor do mecanismo de acionamento no sentido anti-horário
- analisar se a ponta da estrutura voltou a posição inicial
- caso a posição inicial não seja atingida ou for ultrapassada, mede-se a distância entre a posição inicial e a posição real que a ponta da estrutura alcançou
(essa medida é considerada como sendo -0 , pois a estrutura havia se deslocado primeiramente no sentido horário)

Visando evitar erros de desalinhamento, foi construída uma estrutura de referencia fixa a um apoio móvel, como ilustrado na Figura 82 .

Figura 82– Estrutura de referência

A estrutura de referencia construída permite deslizar o apoio móvel seguindo linhas de guia presentes no local de testes, utilizando uma trena, que ao ser fixa as linhas de guia, possibilitava analisar e realizar medições da ponta da estrutura, conforme ilustrado na Figura 83

Figura 83– Apoio móvel

Ao efetuar a segunda bateria de testes foram obtidos os resultados indicados na

Figura 84, onde o eixo vertical representa o deslocamento da ponta da estrutura em milímetros, no eixo horizontal são exibidos o número de medições e a legenda mostra quantas voltas o motor realizou para cada uma das linhas do gráfico.

Figura 84— Resultados experimentais obtidos na segunda bateria de testes

A tabela 6 sintetiza os resultados experimentais obtidos, mostrando o desvio padrão, o deslocamento médio da ponta do robô, o número de voltas relacionado a esse deslocamento e o desvio padrão relativo (DSR) expresso em porcentagem.

Número de Voltas	Deslocamento médio da ponta (mm)	Desvio padrão (mm)	DSR %
+ 30	227	18,88	11,65 %
- 30	254	13,49	6,88 %
+ 60	462	17,51	5,20 %
-60	456	13,50	3,87 %
+120	724	15,05	5,67%
- 120	725	9,72	2,21 %

Tabela 5 – Análise estatística dos resultados experimentais

Ao analisar os dados experimentais obtidos, é possível perceber que com o aumento de rigidez da estrutura, a amplitude de suas deformações diminuíram, porém a repetibilidade aumentou, tendo como o maior desvio padrão relativo 11,65%.

O próximo passo para concluir a automatização do robô seria fazer a instalação do motor de içamento junto à base da estrutura, pois até então a estrutura era içada manualmente. Também estaria contida no escopo da automatização a utilização dos dados obtidos na tabela 6, para programar o CLP de modo que o robô atinja posições diversas no plano de forma automática.

Neste trabalho não foram realizados tais procedimentos, pois acredita-se que os principais resultados já foram obtidos e com isso, fica evidenciada a eficácia da arquitetura de robô contínuo proposta neste trabalho. Além do que, os resultados obtidos demonstram seguros indícios para o pleno atendimento dos requisitos considerados neste estudo de caso, pois, para fazer inspeção de cruzetas não é necessário que os eletricitistas, que irão operar o robô, saibam ou forneçam o posicionamento que a ponta do robô deverá atingir.

Durante a inspeção, os eletricitistas irão posicionar a câmera na extremidade da estrutura de maneira que esta obtenha uma foto com a qual seja possível analisar o estado da cruzeta, caso seja necessário os eletricitistas irão acionar o robô para ajustar o ângulo de visão da câmera. O acompanhamento das imagens exibidas pela câmera seria feito em tempo real utilizando um computador portátil. Acredita-se também que as tarefas acima propostas no sentido de completar a automação não oferecem maiores dificuldades.

5. Conclusão

Ao realizar a revisão bibliográfica foi possível adotar uma classificação que separa os robôs de acordo com seu número de articulações, com isso foi possível separar os robôs em três classes. Dentre essas classes, observa-se que os robôs contínuos possuem mais graus de liberdade que os outros grupos, mecanismos mais simplificados, diagramas de controle menos sofisticados devido ao menor número de atuadores, estruturas com baixo peso que possibilitam a construção de robôs com estruturas dielétricas. Portanto é possível concluir que os robôs contínuos são mais indicados para serem utilizados ao manipular ferramentas a alturas elevadas.

Ao analisar os robôs contínuos encontrados na literatura foi possível perceber que seu volume de trabalho é limitado pela amplitude de suas deformações, porém, ao utilizar uma estrutura telescópica em vez de uma estrutura contínua, é possível expandir o volume de trabalho e manter as características da estrutura contínua. Contudo, ao utilizar estruturas contínuas, esbeltas e de grande comprimento surgem efeitos estruturais que fazem com que esse tipo de estrutura perca a estabilidade, e, dependendo do material, pode até colapsar. Uma das maneiras de evitar que isso aconteça é utilizar estais para estabilizar a estrutura, assim como é feito em torres estaiadas.

Baseando-se no conceito de acionamento extrínseco utilizado por robôs contínuos, é possível perceber que os estais que fazem a estabilização podem ser utilizados para fazer com que a estrutura se deforme e alcance posições desejadas. Porém, para que isso aconteça, é necessário utilizar mecanismo auxiliares que mantenham a estrutura estabilizada e exerça diferentes tensões nos estais de maneira a fazer com que a estrutura contínua se deforme.

Com isso pode-se concluir que ao unir os conceitos de estrutura telescópica, estabilização por estais e acionamento extrínseco é possível propor um robô contínuo que seja mais adequado para trabalhos a alturas elevadas.

Ao adotar o estudo de caso, surgiu a possibilidade de aplicar os conceitos até então desenvolvidos e construir um protótipo para comprovar experimentalmente a arquitetura proposta. Em uma primeira fase foram levantadas as necessidades de projeto do robô telescópico contínuo para inspeção de cruzetas e em uma segunda etapa foram feitas as simulações para realizar a análise estrutural do robô.

A análise estrutural teve como principal objetivo em uma primeira etapa analisar os esforços que os atuadores deveriam exercer sobre a estrutura, porém através das simulações foi possível perceber que dependendo do material utilizado para construção da estrutura o robô poderia colapsar.

Foi feita então em uma segunda etapa a análise de diversos materiais e estudado a viabilização da utilização de cada um deles, após realizar esse estudo concluiu-se que o material mais adequado para a construção da estrutura do robô contínuo flexível eram os tubos de PVC, então foram feitas simulações para verificar a possibilidade da estrutura colapsar, devido ao próprio peso e em uma terceira etapa foram feitas simulações para descobrir a força feita pelos atuadores considerando os efeitos não lineares apresentados pela estrutura esbelta e de grande comprimento.

Ao realizar as análises utilizando o método dos elementos finitos foi possível concluir que é imprescindível levar em consideração os efeitos de não linearidade geométrica da estrutura ao realizar os cálculos estruturais, pois a força gerada pelos atuadores na análise linear foi quatro vezes maior do que as forças geradas no cálculo não linear, ou seja, caso as forças indicadas na análise linear tivessem sido aplicadas a estrutura, ela iria colapsar. Após realizar a análise modal foi possível construir um modelo dinâmico da estrutura que servirá de base para o desenvolvimento de uma estratégia de controle que considera a dinâmica da estrutura.

Com o intuito de validar a arquitetura proposta foi construído um protótipo que foi submetido a testes experimentais, onde foi possível concluir que ao trabalhar com deformações de grande amplitude é necessário utilizar espaçadores para guiar os estais e manter a estrutura estável. Após iniciar a

fase de testes percebeu-se a necessidade de implementar melhorias tanto na estrutura do robô quanto nos mecanismos, foi possível também perceber uma grande dificuldade para monitorar o descolamento na extremidade do robô.

Após implementar as melhorias e analisar os dados experimentais é possível concluir que a arquitetura proposta é mais adequada para manipular ferramentas a alturas elevadas. Também é possível concluir que a arquitetura proposta apresenta uma alta repetibilidade de posicionamento, pois apesar do protótipo mostrar erros de posicionamento na ordem de 12% o robô proposto atende os requisitos de projeto, podendo em uma futura etapa utilizar o mapa de posições e o içamento automático para efetuar trabalhos de inspeção.

Durante o desenvolvimento da pesquisa também foi possível concluir que a arquitetura proposta pode ser utilizada não só para trabalhos a alturas elevadas, mas também trabalhos em locais de difícil acesso onde a estrutura seria posicionada em outras direções além da vertical, com isso é possível expandir consideravelmente o universo de aplicações desse tipo de arquitetura.

Se comparado com os tradicionais robôs manipuladores discretos a arquitetura proposta possui um peso muito inferior e viabiliza a operação em alturas elevadas, porém a precisão é inferior.

Trabalhos futuros poderão analisar o comportamento dinâmico da estrutura, propor modelos de controladores para controlar a estrutura em malha fechada, elaborar sensores para realizar a medição das deformações do robô, estudar a utilização de materiais compósitos aplicados à estrutura do robô, estudar o comportamento de estruturas telescópicas esbeltas sujeitas a carregamentos de torção, analisar o influencia que as folgas entre os perfis telescópicos possuem na repetibilidade do robô e o estudo de arquiteturas com as quais seja possível desenvolver robôs telescópicos mais compactos.

6. Referências Bibliográficas

- [1] SHIBATA, T. **An Overview of Human Interactive robots for Psychological Enrichment.** Proceedings of the IEEE - CODEN IEEPAD ISSN 0018-9219. VOL.92. NO. 11. Nov. 2004. 1749 p.
- [2] **World Robotics 2003: Statistics, Market Analysis, Forecasts, Case Studies and Profitability of Robot Investment.** United Nations Publication coauthored by International Federation of Robotics. pp xiv + 370. ISBN: 92-1-101059-4. ISSN:11020-1076. New York. Geneva. 2003.
- [3] BROADBENT, E; MACDONALD, B.; JAGO, L.; JUERGENS, M.; MAZHARULLAH, O. **Human reactions to good and bad robots.** Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems San Diego. CA. USA. Oct 29. Nov 2. 2007. 3703 p.
- [4] BAUER; J.C. **Service robots in health care: The evolution of mechanical solutions to human resource problems.** Bon Secours Health System, Inc. Technology Early Warning System - White Paper. Disponível em :<http://bshsi.com/tews/docs/TEWS%20Service%20Robots.pdf>. Acesso em 10 set. 2008.
- [5] DARIO, P.; LASCHI, C.; GUGLIELMELLI, E. **Design and experiments on a personal robotic assistant.** Advanced Robotics, Vol. 13, n.2. 1998. 153 p.
- [6] FORLIZZI, J. **Robot products to assist the aging population.** Interactions. ISSN:1072-5520 Vol. 12. Issue 2. 2005. 16 p.
- [7] ICHBIAH, D. **Robots: From Science Fiction to Technological Revolution.** ISBN: 0810959127. New York. Abrams. 2005. 539 p.
- [8] MAEDA, T.; YOSHIDA, K.; HISAO, N.; KAYASHIMA, K.; MAEDA, Y. **Net-accessible pet-type robot for aged people's welfare.** Proceedings of the 2003 IEEE Intl Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Japan. 2003. 130-133 p.

- [9] RANI, P.; SARKAR, N. **Making robots emotional sensitive – preliminary experiments and results**. Proceedings of the 14th Annual IEEE International Workshop on Robots and Human Interactive Communication. (RO-MAN), Nashville. 2005. 6 pp.
- [10] TAMURA, T.; YONEMITSU, S.; ITOH, A.; et al. **Is an entertainment robot useful in the care of elderly people with severe dementia?**. The Journals of Gerontology. 2004. 83-85 p.
- [11] WADA, K.; SHIBATA, T.; MUSA, T.; KIMURA, S. **Effects of robot therapy for demented patients evaluated by EEG**. Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Canada. 2005. 1552-1557 p.
- [12] ROBINSON, G.; DAVIES, J.B.C.; **Continuum Robots - A State of the Art**, IEEE Conf. on Robotics and Automation. Detroit. USA. 1999. 2849 p.
- [13] SHUGEN, M.; GUANGPING, L.; YUKI T.; RYO S.; KOUSUKE I. **A Serpentine Robot Based on 3 DOF Coupled-driven Joint**. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Shenyang, China. August. 2004. 1574 p.
- [14] CHIRIKJIAN, G.S., **Theory and Application of Hyper Redundant Robotic Mechanisms**. 1992. Tese de doutorado. Dept. of Applied Mechanics. California. Institute of Technology.
- [15] HIROSE, S. **Biologically Inspired Robots: Snake-Like Locomotion and Manipulator**. Oxford University Press. 1993. v.1.
- [16] MORI, M.; HIROSE, S. **Three-dimensional serpentine motion and lateral rolling by active Cord Mechanism ACM-R3**. Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on intelligent Robots and Systems. 2002. 829-834 p.
- [17] YAMADA, H.; HIROSE S. **Development of Practical 3-Dimensional Active Cord Mechanism ACM-R4**. J. of Robotics and Mechatronics. 2006. Vol.18. No.3.

- [18] HIROSE, S. **Connected Differential Mechanism and Its Applications**, Proc. 2nd Int. Conf. on Advanced Research. 2005. 319 p.
- [19] YAMADA, H.; CHIGISAKI, S.; MORI, M.; et al. **Development of Amphibious Snake-like Robot ACM-R5**. The Proceedings of 36th International. Symposium on Robotics. 2005.
- [20] HIROSE, S.; UMETANI, Y. **The Kinematics and Control of a Soft Gripper for the Handling of Living or Fragile Objects**. Proc. 2nd Int. Conf. on Advanced Research. 1985. 319-326 p.
- [21] HIROSE, S. **Development of a Super-redundant Multijoint Manipulator for Maintenance of Nuclear Reactors**, Proc. of 2nd Specialist Meeting on Application of Artificial Intelligence and Robotics to Nuclear Plants. 1994. 1 p.
- [22] KIER W.; SMITH K. **Tongues, tenacles and trunks; the biomechanics of movemnt in Muscular Hydrostats**. Zoological Journal of the Linnean Society. 1958. vol. 83. 307-324 p.
- [23] KATHLEEN, K.; KIER, M. **Trunks, Tongues, and Tentacles Moving with Skeletons of Muscle**. American Scientists .February. 1989. 28 p.
- [24] CHEN, G. **Design modeling and control of a micro-robotic tip for colonoscopy**. Tese de doutorado. 2005. INSA de Lyon.
- [25] SUZUMORI, K.; IIKURA, S.; TANAKA, H. **Development of Flexible Microactuator and its Applications to Robotic Mechanisms**. IEEE Conf. on Robotics and Automation. Sacramento. USA. 1991. 1622-1627 p.
- [26] LANE, M.; BRUCE, J.; DAVIES, C.; et al. **The AMADEUS Dextrous Subsea Hand: Desig, Modelling and Sensor Processing**, IEEE Journal of Oceanic Engineering. Janeiro. 1999. Vol. 24. No.1
- [27] LIM, G.; MINAMI, K.; et al. **Multi-link active catheter snake-like motion**, Robotica. 1996. vol 14. 499 pp.

- [28] CIESLAK, R.; MOREKI, A. **Technical Aspects of Design and Control of Elastic's Manipulator of the Elephants Trunk Type**, 5th World Conference on Robotics Research. Sept 27-29. Cambridge Massachusetts. 1994. 13-51 p.
- [29] IKUTA, K.; TSIKAMOTO, M.; HIROSE S. **Shape memory alloy servo actuator system with electrical resistance feedback and application for active endoscope**, IEEE Conference on Robotics and Automation. Philadelphia. Pennsylvania. April 24-29. 1988. 427 p.
- [30] DARIO, P; CARROZA, C.; et al. **A micro robotic system for colonoscopy**. Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Albuquerque. USA. April 20-25. 1997. 1567-1572 p.
- [31] ANDERSON, V.C.; HORN, R.C. **Tensor Arm Manipulator Design**. ASME paper 67-DE-57.1967. 1-12 p.
- [32] HIROSE, S.; CAVE, P.; GOULDEN, C.; **Biologically inspired robots: snake-like locomotion and manipulators**, Oxford, U.K. Univ. Press, 1993.
- [33] HANNAN, M.W.; WALKER, I. D. **Analysis and Experiments with Elephant's Trunk Robot**. International Journal of the Robotics Society of Japan. Vol 15. No 8. 2001. 847-858 p.
- [34] WENDLANDT, J.M., SHANKAR, S. **Design and Control of a simplified Stewart Platform for Endoscopy**. Proceedings of the mrd conference on Decision and Control Lake Buena Vista. December. 1994. 357-362 p.
- [35] SIMAAN, N.; TAYLOR, R.; FLINT, P. **A Dexterous System for Laryngeal Surgery**. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation. New Orleans. LA. April .2004. 351 p.
- [36] TONDU, B.; LOPEZ P. **Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators**. This paper appears in: Control Systems Magazine, IEEE Publication Date: Apr 2000 Vol. 20. Issue 2. 15-38 p.
- [37] ORNDORFF, R.L., **Gripping Device**. US Patent No.3601442. 1971.

- [38] ANDORF, P.; FRANZ, D.; et al. **Robot Finger**. US Patent No. 3981528. 1976.
- [39] WILSON, J.F.; MAHAJAN, U. **The Mechanics and Positioning of Highly Flexible Manipulator Limbs**, Transactions of the ASME Journal Of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design. 1989. Vol 1. 232 p.
- [40] NEMIR, D.C. **"Preliminary Results of the Design of a Robotic Tentacle End-Effector"**, Proc. 1989 American Control Conference, Pittsburgh. 1989. vol. 3; 2374 p.
- [41] ROBINSON, G.; DAVIES, B.C. **"The Parallel Bellows Actuator"**, Robotica 98. Brasov. Romenia. Nov 5-7. 1998. 195-200 p.
- [42] SUZUMORI, K.; IIKURA, S.; TANAKA, H. **Applying a Flexible Microactuator to Robotic Mechanisms**, IEEE Control Systems Magazine. 1992. Vol. 12, Issue 1. 21-27 p.
- [43] WILSON, J.F.; LI, D.; et al. **Flexible Robot Manipulators and Grippers: Relatives of Elephant trunk and Squid Tentacles**, In: Robots and Biological System: Towards a new bionics? .Berlin. 1993. 300 p.
- [44] DAVIES, J.B., **Elephant Trunks an Unforgettable Alternative to Rigid Mechanics**, Industrial Robot. 1991. Vol 28. 29-30 p.
- [45] OHNO, H.; HIROSE. S. **Design of Slim Slime Robot and its Gait of Locomotion**, Proc IROS 01 Hawaii, 2001. 707 p.
- [46] ROBINSON, G.; DAVIES, J.B.; et al. **Mechanical Design, Operation and Direction Prediction of the Amadeus Gripper System**. The International Journal of Systems Science. 1998. Vol. 29. no. 5. 455 p.
- [47] OHNO, H.; HIROSE, S. **Study on Slime Slime Robot (Proposal of Slime Robot and Design of Slim Slime Robot)**, IEEE Conf. on intelligent Robot and Systems, Takamats. Japan. 2000. 2218-2223 p.
- [48] AOKI, T.; OHNO, H.; HIROSE, S. **Design of Slim Slime Robot II (SSR-II) with Bridel Bellows**, Proceedings of the 202 IEEE/RSJ International

Conference on Intelligent Robots and Systems. Lausanne. Switzerland. October. 2002. 835-840 p.

[49] BAILLY, Y.; CHAUVIN, A.; AMIRAT, Y. **Control of a high dexterity micro-robot based catheter for aortic aneurysm treatment**, IEEE International Conference on Robotics Automation and Mechatronics. Singapore, December. 2004. 65-70 p.

[50] KALLIO, P.; LIND, M.; ZHOU, Q.; KOIVO, H.N. **A 3 DOF Piezohydraulic Parallel Manipulator**, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Robots and Automation, Leuven. Belgium. 1998. 1823-1828 p.

[51] NAKAMURA, T.; SAGA, N.; YAEHASHI, K., **Development of a pneumatic artificial muscle based on biomechanical characteristics**. **Industrial Technology**, 2003 IEEE International Conference on Volume 2, 10-12 Dec. 729 – 734 p.

[52] TONDU, B.; LOPEZ, P. **The McKibben Muscle and its use in Actuating Robot-Arms Showing Similarities with Human Arm Behaviour**, Industrial Robot. 1997. Vol. 24, no. 6. 432 – 439 p.

[53] KORNBLUH, R.; PELRINE, R.; et al. **Electrostrictive Polymer Artificial Muscle Actuators**. IEEE International Conference Robotics and Automation. Belgium, 1998. 2147 – 2154 p.

[54] DARIO, P.; CARROZZA, M.C.; PIETRABISSA, A. **Development and in vitro testes of a miniature robotic system for computer-assisted colonoscopy**. Journal of Computer Aided Surgery . 1999. Vol. 4. 4-14 p.

[55] FUKUDA, T.; HOSOKAI, H.; UEMURA, M. **Rubber Gas Actuator Driven by Hydrogen Storage Alloy for In-Pipe Inspection Mobile Robot with Flexible Structure**. Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Scottsdale. Arizona. USA 1989. 1847-1852 p.

[56] ARAMAKI, S.; KANEKO, S.; et al. **Tube type Micro Manipulator Using Memory Shape Alloy (SMA)**. 6 International Symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya. October 4-6. 1995. 115-120 p.

- [57] MINETA, T.; MITSUI, T.; et al. **Batch fabricated flat meandering shape memory alloy actuator for active catheter.** Journal of Sensors and Actuators, A Physical. 2001. Vol.1/Iss:88/2. 112-120 p.
- [58] HEMAMI, A., **Design of Light Weight Flexible Robot Arm,** Robots & conference Proceedings, Detroit. June. 1984.16-23 p.
- [59] IMMEGA, G.; ANTONELLI, K. **The KSI Tentacle Manipulator.** IEEE International Conference Robotics and Automation. Japan. 1995. 3149 – 3154 p.
- [60] MCMAHAN, W.; JONES, B.A.; WALKER, I.D. **Design and Implementation of a Multi-Section Continuum Robot: Air-Octor.** Intelligent Robots and Systems (IROS 2005) IEEE/RSJ International Conference. 2005. Vol. 2. 1 – 8 p.
- [61] MAEDA, S.; ABE, K.; et al. **Active Endoscope with Sma (Shape Memory Alloy) Coil Springs,** Proceedings of the IEEE 9th Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems. San Diego. California. USA. 1996. 290-295 p.
- [62] IVANESCU, M.; STOIAN, V.; **A Variable Structure Controller for a Tentacle Manipulator.** Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Robots and Automation. Nagoya. Japan. 1995. 3155-3160 p.
- [63] MESTON, S.D. **Telescopic Mechanism.** US Patent No.4406097. 1983
- [64] ALVES, F.A. **Elementos finitos a base da tecnologia CAE,** Editora Érica 2005.
- [65] BATHE, K.J. **Finite Element Procedures.** Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1996.
- [66] COOK, R.D. Malkus D.S., Plesha M.E., Witt R.J., **Concepts and Applications of Finite Element Analysis,** John Wiley & Sons, Inc. 30p.
- [67] LIU, G.R.; QUEK, S. **The Finite Element Method: A Practical Course.** Butterworth Heinemann. 2003.

- [68] SOBRINHO, A.S.C. **Introdução ao Método dos elementos finitos**. Editora Ciência Moderna Ltda. 2006.
- [69] DHATT, G.; TOUZOT, G.; CANTIN, G. **The finite element method displayed**. Chichester: John Wiley & Sons, 1984, 509 p.
- [70] BATHE, J.; WILSON, E. L. **Numerical methods in finite element analysis**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1976. 528 p.
- [71] BUCHANAN, G.R., Theory and Problems of Finite Element Analysis, Schauman's Outline Series. McGraw Hill. 1994.
- [72] CLOUGH, R.W.; PENZIEN J. **Dynamic of structures**. McGraw-Hill International Book Company. 1975.
- [73] MEIROVITCH L., **Element of vibration Analysis**, McGraw-Hill International Book Company.1986.
- [74] FORMENTI, D., **Analytical and experimental modal analysis**. University of Cincinnati. 1977.
- [75] SNOEYS, R. et al. **Trends in Experimental Modal Analysis**, Proceedings of the XVII International Seminar on Modal Analysis, Leuven, 1992. 5-27 p.
- [76] PRZEMIENIECKI, J. S.; **Theory of structural analysis**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1968. 468 p.
- [77] MEIROVITCH, L. **Computational Methods in Structural Dynamics**, Sijthoff e Noordhoof International Publisher B. V., 1980.
- [78] MEIROVITCH L.,**Analytical, Methods in Vibrations**. The McMillan Company. United States. 1975
- [79] FRISWELL, M. I.; MOTTERSHEAD, J. E., **Finite Element Model Updating in Structural Dynamics**. Kluwer Academic Publishers. 1995.

- [80] BORGES A.S., **Análise Modal Baseada Apenas na resposta-decomposição no domínio da frequência**. Dissertação de mestrado, São Paulo. Ilha solteira Unesp. 2006.
- [81] HEYLEN, W.; LAMMENS, S.; SAS, PAUL; **Modal Analysis Theory and Testing**, Division of Production Engineering. 1995. Belgium.
- [82] COOK, R. D.; MALKUS, D. S. AND PLESHA, M. E. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc, 1989.
- [83] RUTENBERG, A. **Simplified P-Delta Analysis for Asymmetric Structures**. ASCE Journal of the Structural Division, 1982. Vol. 108, No. 9,
- [84] DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos**. Editora LTC 2001
- [85] RONCOLATTO, R. A., ROMANELLI, N. W.; et al. **Robotics applied for safety improvement in the power distribution lines maintenance**, IEEE PES Transmission and Distribution Conference. 2008. 230 p.
- [86] FIEDLER, N. C.; et al. **Avaliação dos riscos de acidentes em atividades de poda de arvores na arborização urbana do distrito federal**. Revista Árvores. vol. 30. Sociedade de Investigação Florestais Viscosa. Brasil. 2006. 223-233 p.

APÊNDICE A

Código fonte do MATLAB do programa:

Dados de entrada

Número de elementos

N=7;

Comprimento dos tubos e buchas

L=zeros(1,N);

%Compriment do cestágio 1

L_I1 = 2.175; %metro

%Compriment da bucha do estágio 2 com o 1

L_lb12 = 0.1; %metro

%Compriment do cestágio 2

L_I2 = 2.175; %metro

%Compriment da bucha do estágio 3 com o 2

L_lb23 = 0.1; %metro

%Compriment do cestágio 3

L_I3 = 2.175; %metro

%Compriment da bucha do estágio 4 com o 3

L_lb34 = 0.1; %metro

%Compriment do cestágio 4

L_I4 = 2.175; %metro

L_tot =

L_I1+L_lb12+L_I2+L_lb23+L_I3+L_lb34+L_I4;

Módulo de Elasticidade

E= zeros(1,N);

v=0.4; % Módulo de elasticidade do Tubo Pvc

Epvc= 3e+009; % Em Pa

Eaco= 210e+009; % = 210GPa

Módulo de Elasticidade Transversal

Gpvc = Epvc / (2 * (1+ v));

E_I1 = Epvc;

E_lb12 = Epvc;

E_I2 = Epvc;

E_lb23 = Epvc;

E_I3 = Epvc;

E_lb34 = Epvc;

E_I4 = Epvc;

Diâmetro dos tubos

db_I1 = 50 *10^-3

ds_I1 = 44 *10^-3

db_lb12 = 44 *10^-3

ds_lb12 = 39.9 *10^-3

db_I2 = 39.9 *10^-3

ds_I2 = 35.1 *10^-3

db_lb23 = 35.1 *10^-3

ds_lb23 = 32 *10^-3

db_I3 = 32 *10^-3

ds_I3 = 27 *10^-3

db_lb34 = 27 *10^-3

ds_lb34 = 16.3 *10^-3

db_I4 = 16.3 *10^-3

ds_I4 = 12.7 *10^-3

Momentos de Inércia

I=zeros(1,N);

I_I1 = (pi/64)*(db_I1^4 - ds_I1^4) ;

I_lb12 = (pi/64)*(db_lb12^4 - ds_lb12^4);

I_I2 = (pi/64)*(db_I2^4 - ds_I2^4) ;

I_lb23 = (pi/64)*(db_lb23^4 - ds_lb23^4);

I_I3 = (pi/64)*(db_I3^4 - ds_I3^4) ;

I_lb34 = (pi/64)*(db_lb34^4 - ds_lb34^4);

I_I4 = (pi/64)*(db_I4^4 - ds_I4^4) ;

Momentos de Inércia Polar

IP=zeros(1,N);

Ip_I1 = (pi/32)*(db_I1^4 - ds_I1^4) ;

Ip_lb12 = (pi/32)*(db_lb12^4 - ds_lb12^4);

Ip_I2 = (pi/32)*(db_I2^4 - ds_I2^4) ;

Ip_lb23 = (pi/32)*(db_lb23^4 - ds_lb23^4);

Ip_I3 = (pi/32)*(db_I3^4 - ds_I3^4) ;

Ip_lb34 = (pi/32)*(db_lb34^4 - ds_lb34^4);

Ip_I4 = (pi/32)*(db_I4^4 - ds_I4^4) ;

Áreas da seção transversal

A=zeros(1,N);

A_I1 = (pi*(db_I1)^2) - (pi*(ds_I1)^2);

A_lb12 = (pi*(db_lb12)^2) - (pi*(ds_lb12)^2);

A_I2 = (pi*(db_I2)^2) - (pi*(ds_I2)^2);

A_lb23 = (pi*(db_lb23)^2) - (pi*(ds_lb23)^2);

A_I3 = (pi*(db_I3)^2) - (pi*(ds_I3)^2);

A_lb34 = (pi*(db_lb34)^2) - (pi*(ds_lb34)^2);

A_I4 = (pi*(db_I4)^2) - (pi*(ds_I4)^2);

Massas dos tubos

M=zeros (1,N);

M_I1 = den * (A_I1) * (L_I1);

M_lb12 = den * (A_lb12) * (L_lb12);

M_I2 = den * (A_I2) * (L_I2);

M_lb23 = den * (A_lb23) * (L_lb23);

M_I3 = den * (A_I3) * (L_I3);

M_lb34 = den * (A_lb34) * (L_lb34);

M_I4 = den * (A_I4) * (L_I4);

Distâncias até a linha neutra

h =zeros(1,N);

h_I1 = db_I1/2;

h_lb12 = db_lb12/2;

h_I2 = db_I2/2;

h_lb23 = db_lb23/2;

h_I3 = db_I3/2;

h_lb34 = db_lb34/2;

h_I4 = db_I4/2;

Ângulo de inclinação de cada tubo em relação as coordenadas locais

B=zeros(1,N);

B_I1 = -90;

B_lb12 = -90;

B_I2 = -90;

B_lb23 = -90;

B_I3 = -90;

B_lb34 = -90;

B_I4 = -90;

Distribuição dos dados de entrada ao longo da discretização do sistema

for i=N/7

L(i) = L_I1/(N/7);

E(i) = E_I1;

I(i) = I_I1;

Ip(i) = Ip_I1;

```

A(i) = A_l1;
h(i) = h_l1;
B(i) = B_l1;
M(i) = M_l1;
end
for i=((N/7)+1:(2*N/7))
L(i) = L_lb12/(N/7);
E(i) = E_lb12;
I(i) = I_lb12;
Ip(i) = Ip_lb12;
A(i) = A_lb12;
h(i) = h_lb12;
B(i) = B_lb12;
M(i) = M_lb12;
end
for i=((2*(N/7))+1:(3*N/7))
L(i) = L_l2/(N/7);
E(i) = E_l2;;
I(i) = I_l2;
Ip(i) = Ip_l2;
A(i) = A_l2;
h(i) = h_l2;
B(i) = B_l2;
M(i) = M_l2;
end
for i=((3*(N/7))+1:(4*N/7))
L(i) = L_lb23/(N/7);
E(i) = E_lb23;
I(i) = I_lb23;
Ip(i) = Ip_lb23;
A(i) = A_lb23;
h(i) = h_lb23;
B(i) = B_lb23;
M(i) = M_lb23;
end
for i=((4*(N/7))+1:(5*N/7))
L(i) = L_l3/(N/7);
E(i) = E_l3;
I(i) = I_l3;
Ip(i) = Ip_l3;
A(i) = A_l3;
h(i) = h_l3;
B(i) = B_l3;
M(i) = M_l3;

```

```

end
for i=((5*(N/7))+1:(6*N/7))
L(i) = L_lb34/(N/7);
E(i) = E_lb34;
I(i) = I_lb34;
Ip(i) = Ip_lb34;
A(i) = A_lb34;
h(i) = h_lb34;
B(i) = B_lb34;
M(i) = M_lb34;
end
for i=((6*(N/7))+1:(7*N/7))
L(i) = L_l4/(N/7);
E(i) = E_l4;
I(i) = I_l4;
Ip(i) = Ip_l4;
A(i) = A_l4;
h(i) = h_l4;
B(i) = B_l4;
M(i) = M_l4;
end

```

Condições de Contorno

```

% no x,y,z (x=1,y=2,z=3);
%1=engastado 0=livre

```

```

for i=1:N+1;

cont(i,1)=0;
cont(i,2)=0;
cont(i,3)=0;
cont(i,4)=0;
cont(i,5)=0;
cont(i,6)=0;
end
cont(1,1)=1;
cont(1,2)=1;
cont(1,3)=1;
cont(1,4)=1;
cont(1,5)=1;
cont(1,6)=1;

```

APÊNDICE B

Código fonte do MATLAB do programa:

Matrizes Globais

Matriz de incidência

for i=1:N+1

```
inc(1,i)=i;
inc(2,i)=i+1;
end
```

var=0;

for n=1:N+1

```
if cont(n,1)== 1
    var=var+1;
end
if cont(n,2) ==1
    var=var+1;
end
if cont(n,3) == 1
    var=var+1;
end
if cont(n,4) == 1
    var=var+1;
end
if cont(n,5) == 1
    var=var+1;
end
if cont(n,6) == 1
    var=var+1;
end
var;
```

num_presos= var;

Numeração dos nós nas coordenadas globais

nl=0;

for c=1:(N+1)

```
if cont(c,1)==0
    num(1,c) = nl +1;
    nl=nl+1;
end
```

```
if cont(c,2)==0
    num(2,c) = nl +1;
    nl=nl+1;
end
```

```
if cont(c,3)==0
    num(3,c) = nl +1;
    nl=nl+1;
end
```

```
if cont(c,4)==0
    num(4,c) = nl +1;
    nl=nl+1;
end
```

```
if cont(c,5)==0
    num(5,c) = nl +1;
    nl=nl+1;
end
```

```
if cont(c,6)==0
    num(6,c) = nl +1;
```

```
    nl=nl+1;
end
```

end

gdls_livres = nl;

for c=1:N+1;

```
if cont(c,1)==1
    nl = nl+1;
    num(1,c) = nl;
end
```

```
if cont(c,2)==1
    nl = nl+1;
    num(2,c) = nl;
```

end

```
if cont(c,3)==1
    nl = nl+1;
    num(3,c) = nl;
```

end

```
if cont(c,4)==1
    nl = nl+1;
    num(4,c) = nl;
end
```

```
if cont(c,5)==1
    nl = nl+1;
    num(5,c) = nl;
```

end

```
if cont(c,6)==1
    nl = nl+1;
    num(6,c) = nl;
```

end

end

Matriz de conexão

for el=1:N

```
% gdllloc no el
conect(1,el)=num(1,inc(1,el));
conect(2,el)=num(2,inc(1,el));
conect(3,el)=num(3,inc(1,el));
conect(4,el)=num(4,inc(1,el));
conect(5,el)=num(5,inc(1,el));
conect(6,el)=num(6,inc(1,el));
```

```
conect(7,el)=num(1,inc(2,el));
conect(8,el)=num(2,inc(2,el));
conect(9,el)=num(3,inc(2,el));
conect(10,el)=num(4,inc(2,el));
conect(11,el)=num(5,inc(2,el));
conect(12,el)=num(6,inc(2,el));
```

end

Matriz de rigidez do elemento de pórtico espacial nas coordenadas locais

K=zeros(12,12 ,N);

```

for n=1:N
X = 1*E(n)*A(n)/L(n);
Y1 = 12*E(n)*I(n)/L(n)^3;
Y2 = 6*E(n)*I(n)/L(n)^2;
Y3 = 4*E(n)*I(n)/L(n);
Y4 = 2*E(n)*I(n)/L(n);
Z1 = Y1;
Z2 = Y2;
Z3 = Y3;
Z4 = Y4;
S = Gpvc*Ip(n)/L(n);

```

```

K(1,1,n)= X ;
K(1,7,n)= -X;
K(2,2,n)= Y1;
K(2,6,n)= Y2;
K(2,8,n)= -Y1;
K(2,12,n)= Y2;
K(3,3,n)=Z1;
K(3,5,n)=-Z2;
K(3,9,n)=-Z1;
K(3,11,n)=-Z2;
K(4,4,n)= S;
K(4,10,n)=-S;
K(5,5,n)= Z3;
K(5,9,n)= Z2;
K(5,11,n)= Z4;
K(6,6,n)= Y3;
K(6,8,n)= -Y2;
K(6,12,n)= Y4;
K(7,7,n)= X;
K(8,8,n)= Y1;
K(8,12,n)= -Y2;
K(9,9,n)=Z1;
K(9,11,n)=Z2;
K(10,10,n)= S;
K(11,11,n)= Z3;
K(12,12,n)= Y3;
end

```

Matriz de massa do elemento de pórtico espacial nas coordenadas locais

```
Ma=zeros(12,12 ,N);
```

```

for n=1:N
X = 1*E(n)*A(n)/L(n);
Y1 = 12*E(n)*I(n)/L(n)^3;
Y2 = 6*E(n)*I(n)/L(n)^2;
Y3 = 4*E(n)*I(n)/L(n);
Y4 = 2*E(n)*I(n)/L(n);
Z1 = Y1;
Z2 = Y2;
Z3 = Y3;
Z4 = Y4;
S = Gpvc*Ip(n)/L(n);
Ma(1,1,n)= 140 ;
Ma(1,7,n)= 70;
Ma(2,2,n)= 156;
Ma(2,6,n)= 22*L(n);
Ma(2,8,n)= 54;
Ma(2,12,n)= -13*L(n);
Ma(3,3,n)=156;
Ma(3,5,n)=-22*L(n);
Ma(3,9,n)=54;

```

```

Ma(3,11,n)=13*L(n);
Ma(4,4,n)= (140*Ip(n))/A(n);
Ma(4,10,n)=(70*Ip(n))/A(n);
Ma(5,5,n)= 4*(L(n))^2;
Ma(5,9,n)= -13*L(n);
Ma(5,11,n)= -3*(L(n))^2;
Ma(6,6,n)= 4*(L(n))^2;
Ma(6,8,n)= 13*L(n);
Ma(6,12,n)= -3*(L(n))^2;
Ma(7,7,n)= 140;
Ma(8,8,n)= 156;
Ma(8,12,n)= -22*L(n);
Ma(9,9,n)=156;
Ma(9,11,n)=22*L(n);
Ma(10,10,n)= (140*Ip(n))/A(n);
Ma(11,11,n)= 4*(L(n))^2;
Ma(12,12,n)= 4*(L(n))^2;
Ma= (M(n)/420)*Ma;
end

```

Aplicando a simetria as matrizes de massa e rigidez

```

for n=1:N
for j=1:11
for i=j+1:12
K(i,j,n)=K(j,i,n);
Ma(i,j,n)=Ma(j,i,n);
end
end
end

```

Matriz de rotação do elemento de pórtico espacial

```

R=zeros(12,12,N);
for n=1:N
cob=cos(B(n)*pi/180);
seb=sin(B(n)*pi/180);
% for n=1:1
% syms cob seb R
R(1,1,n)=cob;
R(1,2,n)=seb;
R(2,1,n)=-1*seb;
R(2,2,n)=cob;
R(3,3,n)=1;
R(4,4,n)=cob;
R(4,5,n)=seb;
R(5,4,n)=-1*seb;
R(5,5,n)=cob;
R(6,6,n)=1;
R(7,7,n)=cob;
R(7,8,n)=seb;
R(8,7,n)=-1*seb;
R(8,8,n)=cob;
R(9,9,n)=1;
R(10,10,n)=cob;
R(10,11,n)=seb;
R(11,10,n)=-1*seb;
R(11,11,n)=cob;
R(12,12,n)=1;
end

```

Matriz de Massa e Rigidez no sistema Global de Coordenadas

```
for n=1:N
    Kr(:, :, n)=R(:, :, n)*K(:, :, n)*R(:, :, n);
    Mar(:, :, n)=R(:, :, n)*Ma(:, :, n)*R(:, :, n);
end
%
Ns=max(max(conect));
Ks=zeros(Ns,Ns);
Mas=zeros(Ns,Ns);
for n=1:N
    for i=1:12
        for j=1:12
            ii=conect(i,n);
            jj=conect(j,n);
            if ii~=0 & jj~=0
                Ks(ii,jj)=Ks(ii,jj)+Kr(i,j,n);
                Mas(ii,jj)=Mas(ii,jj)+Mar(i,j,n);
            end
        end
    end
end
end
end
```


APÊNDICE C

Código fonte do MATLAB do programa:

Análise Estática Linear

- Análise Linear Impondo Condições de Contorno Não Homogêneas**
 % Vetor das forças Aplicadas (nós livres)
 for i=1:gdls_livres
 Pa(i) = 0;
 end
 Pa=Pa';
 Qb = [0 0 0]';
 %Número de Graus de Liberdade
 sPa=max(size(Pa)); % Tamanho do vetor de forças aplicadas
 na=sPa(1); %Número de Graus de Liberdade Livres
 sQb=max(size(Qb)); % Tamanho do vetor de deslocamentos prescritos
 nb=sQb(1); %Número de Graus de Liberdade Prescritos
 nt=na+nb; %Número Total de Graus de Liberdade
Aplicacao das Condições de Contorno
 Kaa=Ks(1:na,1:na); %livres
 Kab=Ks(1:na,na+1:nt);
 Kba=Kab';
 Kbb=Ks(na+1:nt,na+1:nt); %prescritos (com condições de contorno ou seja presos)
 Pef=Pa-Kab*Qb;
 Fd = Pef; % Copiando o vetor de carregamentos

Aplicando o deslocamento imposto:
 dd=1.5;
 ii= (gdls_livres-5) ; %
Aplicando condição de contorno do lado direito da equação
 for n=1:na
 Fd(n)= Fd(n)- (Kaa(n,ii)*dd);
 Fd(ii)=0;
 end
 Kaaa = Kaa;
Aplicando a condição de contorno a matriz Kaa
 for n=1:na
 Kaa(ii,n)=0;
 Kaa(n,ii)=0;
 end
 Kaa(ii,ii)=1;

Obtendo o vetor de deslocamentos
 Q = inv(Kaa) * Fd;
 Q(ii) = dd;
Obtendo a força necessária para causar o deslocamento imposto
 Fd = Kaaa * Q;

 - Análise Linear Impondo Condições de Contorno Homogêneas**

```
disp ('Cálculo das Forças');
Qx=0;
% Vetor das forças Aplicadas (nos livres)
Pa=0 ;
% Vetor das forças Aplicadas (nos livres)
for i=1:gdls_livres
  Pa(i) = 0;
end
Pa(gdls_livres-5)= 0.8531 ;% X
Pa(38)=0 ;% Z (n vertical)
Pa(39)=0 ;% Y

Pa=Pa';
ik=1;
% Vetor dos deslocamentos Prescritos (nos presos)
Qb = [ 0 0 0 0 0 0 ]';
%Número de Graus de Liberdade
sPa=size(Pa); % Tamanho do vetor de forças aplicadas
na=sPa(1); %Número de Graus de Liberdade Livres
sQb=size(Qb); % Tamanho do vetor de deslocamentos prescritos
nb=sQb(1); %Número de Graus de Liberdade Prescritos
nt=na+nb; %Número Total de Graus de Liberdade

Aplicacao das Condições de Contorno
Kaa=Ks(1:na,1:na); %livres
Kab=Ks(1:na,na+1:nt);
Kba=Kab';
Kbb=Ks(na+1:nt,na+1:nt); %prescritos
Pef=Pa-Kab*Qb;

Solucao das Equacoes para os glds Livres
Qa=Kaa\Pef;
%Reacoes de Apoio
Pb=Kba*Qa+Kbb*Qb;
%Vetor Completo dos Deslocamentos em Coordenadas Globais
Q=[Qa
   Qb];



- Algoritmo para Plotar Gráficos e Resultados

Vetor de Deslocamentos na direção X
j=1;
for i=1:(6*(N+1))
  if j<=(6*N)-2
    Qx(i) = Q(j);
    j=j+6;
  end
end

Qx(7)
Vetor de Deslocamentos na direção Y
j=2;
for i=1:(6*(N+1))
  if j<=(6*N)-2
    Qz(i) = Q(j);
    j=j+6;
  end
end
```

```

end
Vetor de Deslocamentos na direção Z
end
j=3;
for i=1:(6*(N+1))
    if j<=(6*N)-2
        Qy(i) = Q(j);
        j=j+6;
    end
end

% Escala para plotar em relação ao tamanho
físico de cada elemento
Lplot=0;
j=1;
for i=0+(2.175/(N/7)):(2.175/(N/7)):2.175
    Lplot(j) = [i];
    j=j+1;
end

for i=2.175+(0.1/(N/7)):(0.1/(N/7)):2.275
    Lplot(j) = [i];
    j=j+1;
end

for i=2.275+(2.175/(N/7)):(2.175/(N/7)):4.45
    Lplot(j) = [i];
    j=j+1;
end

for i=4.45+(0.1/(N/7)):(0.1/(N/7)):4.55
    Lplot(j) = [i];
    j=j+1;
end

for i=4.55+(2.175/(N/7)):(2.175/(N/7)):6.725
    Lplot(j) = [i];
    j=j+1;
end

for i=6.725+(0.1/(N/7)):(0.1/(N/7)):6.825
    Lplot(j) = [i];
    j=j+1;
end

for i=6.825+(2.175/(N/7)):(2.175/(N/7)):9

```

```

Lplot(j) = [i];
j=j+1;
end

Qxplot (1) = 0;
for i=1:N
    Qxplot(i+1) = Qx(i);
end

```

```

Qyplot (1) = 0;
for i=1:N
    Qyplot(i+1) = Qy(i);
end

```

```

Qzplot (1) = 0;
for i=1:N
    Qzplot(i+1) = Qz(i);
end

```

Gradiente de comprimentos relacionado com os elementos

```

Lplot2 (1) = 0;
for i=1:(N)
    Lplot2(i+1) = Lplot(i);

```

End

Plotando a estrutura

```

plot3(Qx,Lplot,Qz,Lplot,Qy,Lplot);

```

Plotando as estruturas seqüencialmente

```

%
% plot(Qxplot'+N,Lplot2','-ob','markersize',2)
% axis equal;
% Grid on
% title('Estrutura Deformada')
% xlabel('x(m)')
% ylabel('y(m)')
% Hold on
% Plotando somente uma estrutura
plot3(Qxplot',Qyplot',Lplot2','-ob','markersize',4)
axis equal;
Grid on

```

APÊNDICE D

Código fonte do MATLAB do programa:

Análise Estática Não Linear

```
disp('Cálculo das Forças');
disp('Cálculo não linear em X (gdls_livres -5 ) e em Y (gdls_livres -3 )');
Qx=0;
% Vetor das forças Aplicadas (nos livres)
Pa=0 ;
% Vetor das forças Aplicadas (nos livres)
for i=1:gdls_livres
    Pa(i) = 0;
end
% Pa(37)=0.49 ;% X (Em newtons) gdls_livres-5
% Pa(38)=2.2 ;% Z (n vertical) gdls_livres-4
% Pa(39)=0.5 ;% Y gdls_livres-3
Pa(37)=0.26 ;% X (Em newtons) gdls_livres-5
Pa(38)=17.14*Pa(37) ;% Z (n vertical) gdls_livres-4
Pa(39)=0 ;% Y gdls_livres-3
```

Processo P-Delta

```
Heqx = zeros (n*6,1);
Heq = zeros (n*6,1);
Pyyj =zeros (n*6,1);
Pa=Pa';
Pa_0 = Pa;
```

Cálculo do P- Delta

```
% Vetor de carregamentos na vertical
j=2;
Pyj = zeros (n*6,1);
for i=1:(6*(N+1))
    if j<=(6*N)-2
        Pyj(j) = Pa(j);%9.81*M(i) + Pa(j); % Onde 9.81 * M é o peso de cada elemento
        Pyi(i) = Pa(j);%9.81*M(i) + Pa(j);
        Pyyj(j)=0;%9.81*M(i); % Vetor apenas dos pesos
        j=j+6;
    end
end
```

% Inserindo o peso no vetor de carregamentos

```
Pa = Pa + Pyyj;
Pa_1 = Pa;
```

% Isolando os carregamentos em X

```
j=1;
Pxj = zeros (n*6,1);
for i=1:(6*(N+1))
    if j<=(6*N)-2
        Pxj(j) = Pa(j); % Onde 9.81 * M é o peso de cada elemento
        Pxi(i) = Pa(j);
        j=j+6;
    end
end
```

Número de Interações

```
Nn = 70;
f(1)=0;
```

```
for ik=1:Nn
```

```
% Vetor dos deslocamentos Prescritos (nos presos)
Qb = [ 0 0 0 0 0 0]';
%Número de Graus de Liberdade
```

```
sPa=size(Pa); % Tamanho do vetor de forças aplicadas
na=sPa(1); %Número de Graus de Liberdade Livres
sQb=size(Qb); % Tamanho do vetor de deslocamentos prescritos
nb=sQb(1); %Número de Graus de Liberdade Prescritos
nt=na+nb; %Número Total de Graus de Liberdade
```

Aplicacao das Condições de Contorno

```
Kaa=Ks(1:na,1:na); %livres
Kab=Ks(1:na,na+1:nt);
Kba=Kab';
Kbb=Ks(na+1:nt,na+1:nt); %prescritos
Pef=Pa-Kab*Qb;
```

Solucao das Equacoes para os glds Livres

```
Qa=Kaa\Pef;
```

Reacoes de Apoio

```
Pb=Kba*Qa+Kbb*Qb;
```

Vetor Completo dos Deslocamentos em Coordenadas Globais

```
Q=[Qa
    Qb];
```

Cálculo da força virtual (H) em x causada pela não linearidade geométrica

```
for cc=1:N
    Heqx(cc,1) = Pyi(cc) * (Qx(cc))/L_t(cc); % %
    escrevendo K continuamente x1 x2 x3
    Heqx(7)
end
% Escrevendo o vetor H em coordenadas J x1 0 0 0 0
0 0 x2 0 0 0
j=1;
for i=1:(6*(N+1))
    if j<=(6*N)-2
        Heq(j) = Heqx(i); % Onde 9.81 * M é o peso de cada elemento
        j=j+6;
    end
end
```

Atualizando o carregamento em X

```
% Pxj = Heq + Pxj;
Somando os esforços obtidos ao vetor de carregamentos ja existente;
Pa = Pa_1 + Heq;
```

Obtendo os vetores de deformação de cada ponto

```
for jj=1:7
    fx(ik,jj) = Qx(jj); % Somando a def a def original
end
```

APÊNDICE E

Código fonte do MATLAB do programa:

Análise Dinâmica Linear

Análise Modal utilizando MEF

```
A= inv(Maa)*Kaa;  
[autovetores,autovalores]=eig(A);  
for c=1:na  
    autoval(c,1) = autovalores(c,c);  
end  
lambda = min(min(autoval));
```

Vetor de frequencias naturais

```
w = sqrt(lambda);  
Wc = w/(2*pi);
```

Calculando os autovetores ou modos naturais que correspondem a cada frequência

```
i=1;  
    % Freq natural do modo 1 2 e 3  
E = Kaa - (w^2 * Maa);  
Vetor "deslocamentos modais  
Phi = zeros (na,1);  
ii=gdls_livres-5;  
Phi(ii)=1;
```

Aplicando condição de contorno do lado direito da equação

```
for n=1:gdls_livres  
    Phi(n)= Phi(n) - (E(n,ii)*1);  
end  
Phi(ii)=1;
```

Aplicando a condição de contorno a matriz T -lado direito

```
for n=1:gdls_livres  
    E(ii,n)=0;  
    E(n,ii)=0;  
end  
E(ii,ii)=1;
```

EE =E ;

Vetor dos modos de vibrar

```
Phir(:,i) = inv(E) * (Phi);  
j=(N*3)-2;  
j=1
```

```
y(1)=0;  
z = 1;  
x(1)=0;  
y(1)=0;  
for i=1:N  
    x(i+1) = Phir(j,1);  
    y(i+1) = y(z)+L(i);  
    z=z+1;  
    j=j+6;
```

end

Massa generalizada para o primeiro modo de vibrar

$$M_gen = (Phir)' * Maa * Phir;$$

Rigidez generalizada para o primeiro modo de vibrar

$$K_gen = (Phir)' * Kaa * Phir;$$

Amortecimento generalizadp para o primeiro modo de vibrar

```
Xsi=0.05;  
C_gen = 2*Xsi*M_gen*w;
```