

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE  
MINAS GERAIS**  
*CAMPUS DIVINÓPOLIS*  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Walter Campos Souza

**Desenvolvimento de um Sistema de Movimentação Tipo  
Pórtico Para Aplicações em Projetos de Robótica**

Divinópolis.

2014.

Walter Campos Souza

## **Desenvolvimento de um Sistema de Movimentação Tipo Pórtico Para Aplicações em Projetos de Robótica**

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Áreas de integração: Mecânica, Eletrônica, Computação.

Orientador: Prof. Me. Cláudio Parreira Lopes

Divinópolis.

2014.

Walter Campos Souza

## **Desenvolvimento de um Sistema de Movimentação Tipo Pórtico Para Aplicações em Projetos de Robótica**

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Áreas de integração: Mecânica, Eletrônica, Computação.

Comissão Avaliadora:

---

Prof. Me. Cláudio Parreira Lopes

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET MG

---

Prof. Dr. Renato Sousa Dâmaso

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET MG

---

Prof. Me. Josias Gomes Ribeiro Filho

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET MG

Divinópolis.

2014.

Dedico este trabalho aos meus pais, professores e amigos, por estarem presentes na minha caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me presentear com a coragem, sabedoria e empenho a cada passo deste trabalho, mostrando o caminho e direcionando à trajetória mais segura.

Agradeço de forma veemente a minha família, Sr. Walter Gonzaga de Souza, Sra. Maria de Lurdes Campos Souza, Luiz Saint-Clair Campos Souza, Luana Maíra Campos Souza, Sra. Rozena de Campos Álvares, Sra. Vicentina Campos, meus amigos e companheiros de jornada, pelo apoio, carinho e empenho para minha formação educacional.

“A ciência de hoje é a tecnologia de amanhã!”

*Edward Teller*

## RESUMO

A utilização de manipuladores está cada vez mais frequente na manufatura dos bens de consumo. Mesmo com essa tendência, a indústria ainda utiliza de mão de obra não automatizada nas linhas de produção. Neste trabalho estudou-se os tipos de manipuladores presentes no mercado e suas aplicações, observando-se sua forma construtiva, tipos de acoplamentos, tipos de acionamento e localização dos atuadores. Utilizou-se como referência um manipulador do tipo pórtico, acionado de forma linear por motores de passo conectados a barras roscadas, comandados por *software* CNC através de uma placa *Arduino Uno-R3* e um conjunto de microcontroladores. Adotou-se como critérios de validação do equipamento sua resposta à repetibilidade e sua estabilidade estrutural. O manipulador construído apresentou repetibilidade de posicionamento para coordenadas compreendidas entre 10-81 mm, porém não obteve resultados satisfatórios para posicionamento compreendidos entre 91-200 mm. Conclui-se que a obtenção de posições no plano de trabalho do pórtico depende diretamente das distâncias percorridas pelo efetuator, das folgas mecânicas do conjunto e das características do parafuso de potência utilizado.

**Palavras-chave:** Manipulador. Precisão. Posicionamento. CNC. Motor de passo.

## ABSTRACT

The use of defeat is increasingly used in the manufacture of consumer goods. Despite this trend, the industry still uses labor non-automated production lines. In this work the types of gifts handlers in the market and its applications, noting its constructive form, types of couplings, drive types and locations of the actuators. Was used as a reference manipulator gantry, powered by linearly connected to threaded rods step motors, controlled by CNC software through an Arduino Uno-R3 plate and a number of microcontrollers. It was adopted as equipment validation criteria its response to the repeatability and its structural stability. The handler had built positioning repeatability to coordinate between 10-81 mm, but not achieved satisfactory results for placement of between 91-200 mm. It is concluded that obtaining positions in the porch of the work plan depends directly on the distance traveled by the effector, the backlash assembly and power screw features used.

**Keywords:** Manipulator. Accuracy. Positioning. CNC. Stepper motor.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Exemplo de um robô industrial (adaptado de IFR, 2014).....	6
Figura 2.2 - Modelos de robôs industriais (IFR, 2014).....	7
Figura 2.3 - Comparação da estrutura antropomórfica de um robô (ROJAS, 2014).....	8
Figura 2.4 - Espaço de trabalho de um manipulador esférico (SPONG, HUTCHINSON e VIDYASAGAR, 2006).....	8
Figura 2.5 - Exemplos de manipulador <i>Scara</i> (IFR, 2014).....	9
Figura 2.6 - Esquema de um manipulador cilíndrico (SPONG, HUTCHINSON e VIDYASAGAR, 2006).....	9
Figura 2.7 - a) Robô de propósito geral modelo KR1300PA (KUKA, 2014); b) Robô para soldagem modelo <i>Smart5 Arc4</i> (COMAU, 2014).....	10
Figura 2.8 - Utilização de robô cirurgião na medicina (REVISTA ISTO É, 2014).....	11
Figura 2.9 - Folga <i>backlash</i> num par de engrenagens (PADOIN, MENUZZI e VALDIERO, 2010).....	13
Figura 2.10 - Esquema de movimentação associado ao fuso (FERREIRA, 2000).....	16
Figura 2.11 - Representação de parafuso de potência (BUDYNAS e NISBETT, 2011).....	16
Figura 2.12 - a) Elevação de carga; b) Descimento de carga (BUDYNAS e NISBETT, 2011).....	17
Figura 2.13 - Rosca com carga normal inclinada (BUDYNAS e NISBETT, 2011).....	19
Figura 2.14 - Esquema de bobina para motores de passo (PAWLAK, 2007).....	20
Figura 2.15 - Esquema do microcontrolador/bobinas de um motor de passo (PAWLAK, 2007).....	21
Figura 2.16 - Esquema de saída de pulsos/bobina de um motor de passo (PAWLAK, 2007).....	21

Figura 2.17 - Esquema de ligação de um motor bipolar (PAWLAK, 2007).....	22
Figura 2.18 - Saída das fases das bobinas de um motor de passo (PAWLAK, 2007).....	23
Figura 2.19 - Motor de passo de relutância variável (BISHOP, 2002).....	24
Figura 3.1 - Modelo em 3D do protótipo.....	27
Figura 3.2 - Placa <i>Arduino Uno-R3</i> .....	28
Figura 3.3 - <i>Driver Pololu A4988</i> .....	28
Figura 3.4 - Esquema de conexão do <i>driver Pololu A4988</i> (ROBOCORE, 2014).....	29
Figura 3.5 - a) Interior do <i>shield</i> ; b) Exterior do <i>shield</i> .....	30
Figura 3.6 - Motor de passo <i>Nema 17HD0046</i> .....	30
Figura 3.7 - Montagem do eixo de transmissão para atuador linear do eixo Y.....	31
Figura 3.8 - a) Torno <i>Clark C-18251</i> ; b) Fresadora <i>Nardini Diplomat 3001</i> .....	31
Figura 3.9 - Eixos guia do carro de translação.....	32
Figura 3.10 - Eixos guia do carro Z.....	32
Figura 3.11 - Parafusos de acionamento dos carros.....	33
Figura 3.12 - Peças fresadas e furadas prontas para montagem.....	33
Figura 3.13 - Colunas de sustentação do protótipo.....	34
Figura 3.14 - a) Blocos-padrão utilizados nas medições; b) Aproximação da ponta apalpadora do relógio comparador.....	35
Figura 4.1 - Gráfico das variações de posição Grupo 1.....	39
Figura 4.2 - Gráfico das variações de posição Grupo 2.....	39
Figura 4.3 - Análise do deslocamento.....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 -	Coordenadas escolhidas para realização dos testes Grupo 1.....	35
Tabela 3.2 -	Coordenadas escolhidas para realização dos testes Grupo 2.....	35
Tabela 4.1 -	Variações de posição dos eixos coordenados X, Y e Z do Grupo 1.....	36
Tabela 4.2 -	Variações de posição dos eixos coordenados X, Y e Z do Grupo 2.....	36
Tabela 4.3 -	Análise estatística dos dados Grupo 1.....	37
Tabela 4.4 -	Análise estatística dos dados Grupo 2.....	37
Tabela A.1 -	Dados de componentes.....	53
Tabela A.2 -	Propriedades de estudo.....	54
Tabela A.3 -	Unidades utilizadas.....	54
Tabela A.4 -	Propriedades do material.....	55
Tabela A.5 -	Informações da malha.....	56
Tabela A.6 -	Resultados de <i>Von Mises</i> .....	57
Tabela A.7 -	Resultados da simulação de deslocamento.....	58
Tabela A.8 -	Códigos G segundo padrão <i>ISO</i> (SILVA, 2008).....	62
Tabela A.9 -	Códigos M segundo padrão <i>ISO</i> (SILVA, 2008).....	63

# LISTA DE NOTAÇÕES E ACRÔNIMOS

## Letras Latinas

A -	ampére
$C(q(t), \dot{q}(t))$ -	efeito centrífugo e de <i>Coriolis</i>
F -	carga de trabalho - Força [N]
$G(q(t))$ -	efeito da gravidade
$I_{rotor}$ -	inércia do rotor
$I_{Eq}$ -	inércia equivalente
$M_{RL}$ -	torque de atrito no rolamento
$M(q(t))$ -	matriz de inércia do manipulador
m -	massa movida [Kg]
$m_F$ -	massa do fuso [Kg]
N -	força normal [N]
P -	força peso [N]
p -	passo [m]
$r_F$ -	raio nominal do fuso [m]
$T_{din}$ -	torque dinâmico
$T_a$ -	torque de acionamento
$T_t$ -	torque total
V-	tensão [volt]
$V_{ref}$ -	tensão de referência [volt]

## Letras Gregas

$\alpha$ -	meio ângulo de rosca
$\lambda$ -	ângulo de hélice
$\eta$ -	coeficiente de eficiência mecânica
$\ddot{\theta}$ -	aceleração angular
$\theta_1$	ângulo da engrenagem movida
$\theta_m$	ângulo da engrenagem motora
$\pi$ -	pi
$\tau(t)$ -	vetor de torque-força aplicado nas juntas

$\Pi(t)$ -	força/torque externa atuada no enésimo corpo
$\tau_v$ -	efeito de atrito viscoso
$\tau_c(q(t) * \dot{q}(t))$	atrito de <i>Coulomb</i>

### **Acrônimos**

ABNT-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD-	<i>Computer Aided Design</i>
CAM-	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CLP-	Controlador Lógico Programável
CN-	Comando Numérico
CNC-	Comando Numérico Computadorizado
ISO-	<i>International Organization of Standardization</i>
IFR-	<i>International Federation of Robotics</i>
MMC-	Máquina de Medição de Coordenadas
RIA-	<i>Robotic Industries Association</i>
SCARA-	<i>Selective Compliance Articulated Robot Arm</i>
USB-	<i>Universal Serial Bus</i>
VDC-	Tensão Contínua

# SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO .....	1
1.1- DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	1
1.2- MOTIVAÇÃO .....	1
1.3- OBJETIVO GERAL .....	2
1.4- OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.5- CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA .....	2
1.6- ESCOPO DO TRABALHO.....	3
2- REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1 HISTÓRIA E DEFINIÇÕES.....	4
2.2 EXEMPLOS DE MANIPULADORES .....	6
2.3 APLICAÇÕES INDUSTRIAIS .....	10
2.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MANIPULADORES.....	11
2.5 TRANSMISSÕES MECÂNICAS DE MANIPULADORES ROBÓTICOS.....	12
2.6 DINÂMICA DO MANIPULADOR.....	14
2.7 MECÂNICA DOS PARAFUSOS DE POTÊNCIA.....	16
2.8 MOTORES DE PASSO E <i>DRIVERS</i> .....	20
2.9 CONTROLE NUMÉRICO COMPUTADORIZADO.....	25
3- METODOLOGIA .....	27
3.1 <i>SOFTWARE</i> E <i>HARDWARE</i> .....	27
3.2 ATUADORES.....	30
3.3 MÁQUINAS UTILIZADAS NA FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	31
3.4 COMPONENTES E MONTAGEM DO PROTÓTIPO .....	32
3.4 AQUISIÇÃO DE DADOS .....	34
4- RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1 ANÁLISE DO POSICIONAMENTO DO MANIPULADOR .....	36
4.2 ANÁLISE DA ESTRUTURA MECÂNICA .....	40
4.3 ANÁLISE DA ELETRÔNICA E ATUADORES .....	41

5- CONCLUSÕES.....	42
6- PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	43
7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
APÊNDICE 1.....	47
APÊNDICE 2.....	53
APÊNDICE 3.....	59
APÊNDICE 4.....	61
ANEXO 1 .....	62

# **1- INTRODUÇÃO**

A montagem de equipamentos com peças múltiplas é um processo que demanda grande repetibilidade e precisão do operador. Produtos confiáveis somente são obtidos quando realiza-se esta tarefa utilizando máquinas com comandos mecatrônicos. Com a automação das linhas de produção, emprega-se a mão de obra tradicional integrada à montagem autônoma, o que permite a obtenção de elevados padrões de qualidade na manufatura.

## **1.1- DEFINIÇÃO DO PROBLEMA**

A montagem manual de equipamentos requer treinamentos específicos e experiência dos operadores, o que pode causar erros no processo de fabricação com consequente perda de tempo para retrabalho. A automação de sistemas manuais é uma alternativa confiável para solução deste problema, sendo implementada com auxílio da engenharia. Neste sentido, o processo automatizado busca o aumento da qualidade e da velocidade de produção, aliado à segurança e à eficiência de fabricação. A utilização da automação é importante para o desenvolvimento dos processos produtivos porque minimiza a variabilidade dos resultados, tornando-os mais confiáveis e menos imprevisíveis devido à interferência do homem, padronizando os produtos resultantes das linhas de fabricação.

## **1.2- MOTIVAÇÃO**

Observando-se a cadeia produtiva durante o período de estágio supervisionado, notou-se que os erros provenientes de falhas humanas são os principais responsáveis pelos atrasos na produção. Assim, identificou-se a necessidade de estudar alternativas para minimizar esta ocorrência e realizar a aplicação dos conhecimentos adquiridos no curso de graduação. Além disso, buscou-se desenvolver habilidades para otimização de tarefas, de modo que estudos e projetos apresentem padronização e cumpram critérios da qualidade exigidos pelo mercado.



### **1.3- OBJETIVO GERAL**

Este trabalho tem como objetivo geral mostrar a capacidade e as aplicações da integração de áreas estudadas no curso de Engenharia Mecatrônica. Especificamente, baseou-se numa necessidade encontrada na indústria: o aperfeiçoamento da mão de obra convencional. Através da automação, tarefas que envolvem riscos, processos repetitivos e atividades que excedem a capacidade humana podem ser realizadas de forma melhorada.

### **1.4- OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Este projeto trata do estudo de um manipulador tipo pórtico, controlado por código G, acionado por atuadores lineares movimentados por motores de passo bipolares fixados por meio de barras roscadas para movimentação dos carros. Buscou-se obter os principais requisitos de um sistema mecatrônico: precisão do sistema e repetibilidade na realização das tarefas.

### **1.5- CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA**

Atualmente os tipos de manipuladores utilizados na indústria variam com a aplicação e a necessidade de movimentação no espaço de trabalho. Nas linhas de montagem de pequenos componentes utilizam-se manipuladores paralelos e do tipo *Scara*, devido à grande velocidade e repetibilidade. Já nas linhas de produção que necessitam de robôs industriais com grande robustez, utilizam-se manipuladores antropomórficos com grande capacidade de movimentação, força e precisão. Manipuladores pórticos são utilizados em máquinas de corte a *laser*, a plasma, fresadoras, enfim, nos equipamentos em que a precisão torna-se um parâmetro de importância na produção.

## **1.6- ESCOPO DO TRABALHO**

Este trabalho mostra o estudo feito para a construção do protótipo de um manipulador tipo pórtico. Seus capítulos são divididos em Revisão da Literatura, onde procurou-se abordar a teoria aplicada na construção de robôs industriais, dimensionamento de componentes e funcionamento de equipamentos utilizados para realização de tarefas. No capítulo Metodologia, abordou-se os materiais utilizados, métodos de construção e tipos de equipamentos, bem como os procedimentos para validação do projeto. No capítulo Resultados e Discussões, mostrou-se os dados provenientes do trabalho realizado. Finalmente, no capítulo Conclusões listou-se as principais contribuições deste trabalho, bem como sugeriu-se propostas de continuidade para pesquisa de temas relacionados a este projeto.

## 2- REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 HISTÓRIA E DEFINIÇÕES

Atualmente em seus processos, a automação de sistemas de manufatura e linhas de produção têm se tornado independente da intervenção humana. Tal fato caracteriza-se pela alta da qualidade, eficiência e redução dos tempos de produção, que são parâmetros presentes nos sistemas eletromecânicos dotados de grande repetibilidade e precisão.

Segundo Craig (2005), a história da automação industrial é caracterizada por períodos de rápida mudança nos métodos tradicionais, descritos por novas técnicas de produção e ligados intimamente ao comportamento da economia mundial. A utilização do robô como dispositivo auxiliar, por exemplo, tornou-se identificável a partir de 1960. O projeto de sistemas assistidos por computador (CAD) e sistemas de manufatura auxiliada por computador (CAM), caracterizam as tendências de automação na manufatura de processos.

Segundo RIA (2014), o robô industrial é definido como um manipulador multifuncional reprogramável, projetado para movimentar materiais, partes, ferramentas ou peças especiais através de comandos programados, utilizado no desempenho de tarefas variadas.

Segundo a norma ISO-8373 (2012), o robô é definido como uma máquina manipuladora dotada de inúmeros graus de liberdade, controlada automaticamente, reprogramável, multifuncional, com três ou mais eixos, com fixação estática ou dinâmica, empregada em aplicações de automação industrial. Os termos reprogramável e multifuncional referem-se aos casos em que os movimentos ou funções do robô podem ser modificados, sem alterações físicas. Essas alterações incluem novos arranjos da estrutura mecânica ou do sistema de controle do equipamento.

Segundo Craig (2005), num manipulador existem parâmetros que definem sua utilização e aplicabilidade, podendo-se citar:

- Número de graus de liberdade: valor que corresponde ao número de juntas móveis existentes e necessárias para realização de uma tarefa;
- Espaço de trabalho: é a área de atuação do efetuador;

- Capacidade de carga: é um parâmetro que depende do dimensionamento estrutural dos membros articulados, do sistema de transmissão de energia mecânica e dos atuadores. A carga aplicada nos atuadores e a carga aplicada no sistema de acionamento são variáveis que permitem configuração do robô. O tempo de permanência carregado deve-se à carga dinâmica e está relacionado à velocidade inercial e às forças atuantes;
- Velocidade: é a rapidez na qual o equipamento é capaz de realizar uma tarefa;
- Repetibilidade e precisão: são as características mais importantes no contexto de um projeto. Representam a capacidade do manipulador de realizar uma tarefa repetidas vezes garantindo a precisão, sem prejudicar o resultado final esperado.

Segundo Craig (2005), um robô industrial é formado pela interação dos seguintes componentes:

- Manipulador mecânico: refere-se à estrutura e mecanismos móveis. Consiste na combinação de elementos estruturais rígidos conectados entre si, como por exemplo, a conexão entre o corpo e a base ou a conexão entre o corpo e a ferramenta;
- Atuadores: são conversores de energia elétrica, hidráulica ou pneumática em potência mecânica. Nos dispositivos robóticos possibilitam a movimentação dos corpos através da transmissão de forças e/ou torques nas juntas, permitindo assim os deslocamentos relativos dos corpos;
- Sensores: são dispositivos de realimentação de informações que fornecem dados referentes ao comportamento do manipulador. Fornecem dados como posição e velocidade dos corpos e dados referentes ao modo de interação entre o equipamento e o ambiente de operação. Como exemplo, pode-se citar força, torque e parâmetros do sistema de visão, que são enviados à controladora;
- Unidade de controle: responsável por monitorar e gerenciar os parâmetros operacionais requeridos para realizar as tarefas do robô. Os comandos de movimentação são enviados aos atuadores através de controladores de movimento (computadores, CLP's, placas controladoras de passo, entre outros) sendo baseados nas informações obtidas através de sensores;
- Unidade de potência: responsável pela alimentação para o movimento dos atuadores. Entre as unidades de potência existentes pode-se citar a fonte elétrica, a bomba hidráulica e a fonte pneumática, sendo associados a atuadores, eletromagnéticos, hidráulicos e pneumáticos, respectivamente.

- Efetuador: é o elo de ligação entre o robô e a tarefa. A ferramenta tipo garra é um exemplo de efetuador. Possui como função pegar determinado objeto, transportá-lo a uma posição pré-determinada e, ao alcançar o ponto escolhido, soltá-lo. Segundo Craig (2005), outros tipos de dispositivos podem ser utilizados como efetadores, realizando determinadas ações numa peça sem a necessidade de manipulá-la. Alguns destes componentes podem ser observados na Figura 2.1.

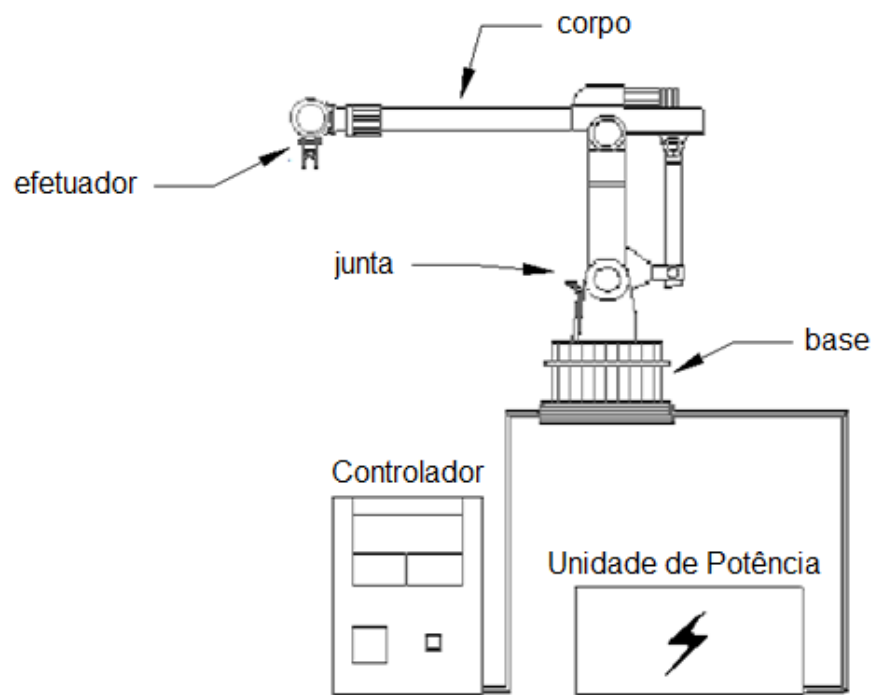


Figura 2.1 - Exemplo de um robô industrial (adaptado de IFR, 2014).

## 2.2 EXEMPLOS DE MANIPULADORES

Robôs industriais são classificados quanto a sua estrutura mecânica e/ou espaço de trabalho. São divididos em antropomórficos, robôs tipo *Scara*, tipo cartesiano ou pórtico, cilíndricos, esféricos e paralelos. A Figura 2.2 exemplifica alguns modelos de robôs industriais.

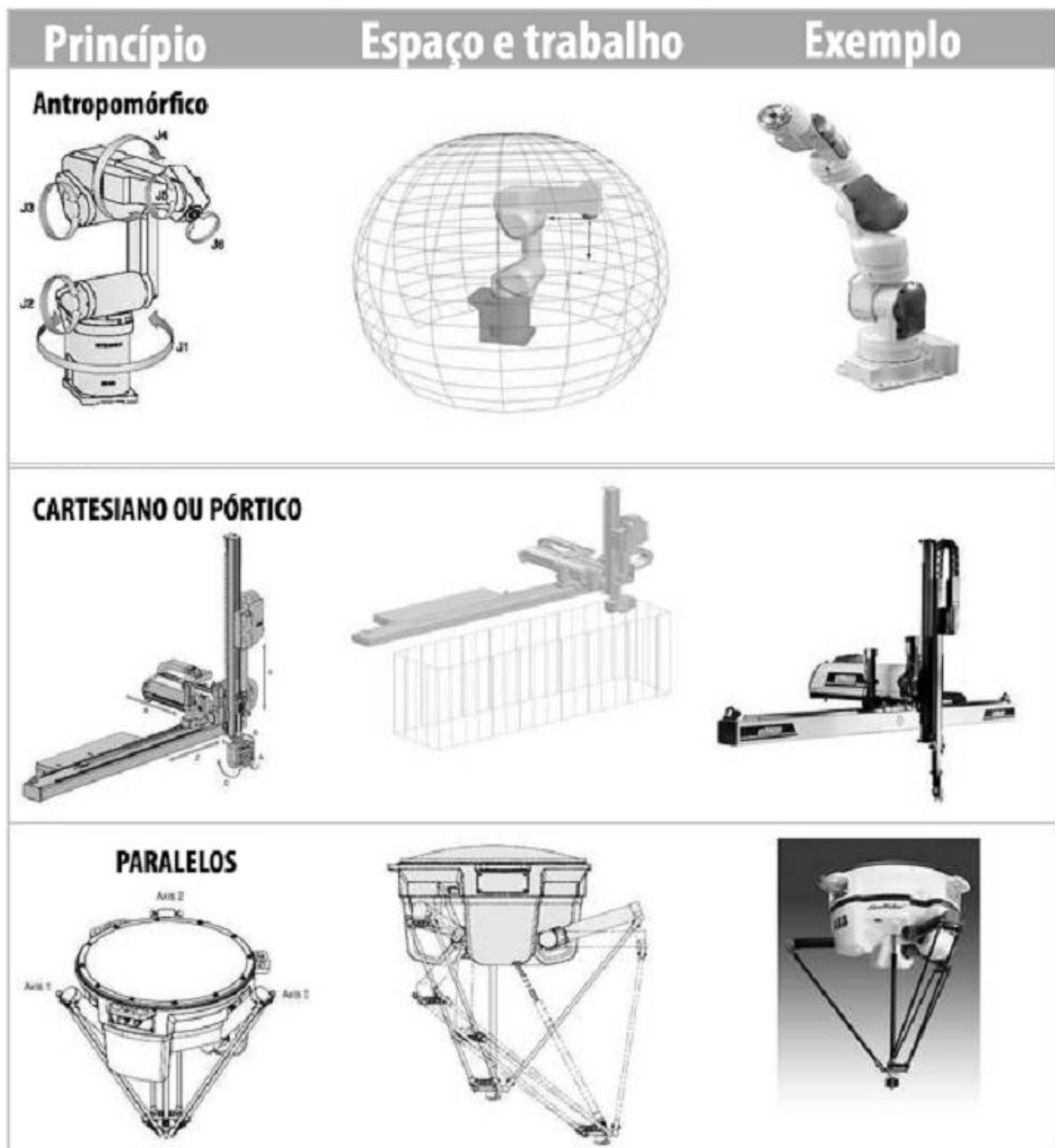


Figura 2.2 - Modelos de robôs industriais (IFR, 2014).

De acordo com Spong, Hutchinson e Vidyasagar (2006), as combinações de juntas prismáticas e rotacionais geram vários arranjos cinemáticos, onde pode-se adequar a aplicação da tarefa pelo manipulador. Na prática, somente alguns modelos cinemáticos são usados. Dentre estes modelos pode-se citar:

- Manipuladores articulares: são também chamados de manipuladores de revolução, cotovelares ou antropomórficos. Neste tipo de configuração, o equipamento assemelha-se a um braço humano em relação às suas juntas, pois possui pulso, antebraço, cotovelo, braço, ombro e cintura. Uma analogia pode ser observada na Figura 2.3.

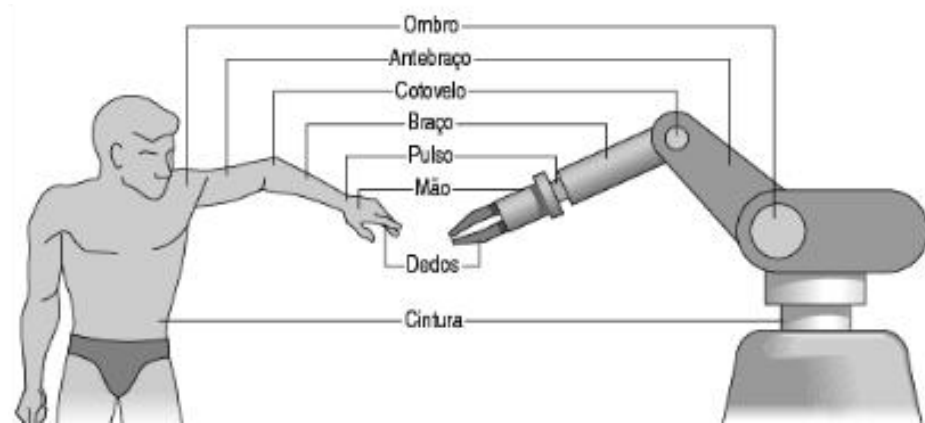


Figura 2.3 - Comparação da estrutura antropomórfica de um robô (ROJAS, 2014).

- Manipulador esférico: neste tipo de manipulador, as coordenadas das juntas coincidem com as coordenadas esféricas do efetuador. Estas coordenadas também possuem relação com as coordenadas da junta do ombro do manipulador. Este equipamento possui juntas rotacionais, sendo uma localizada na cintura e outra no ombro, além de outra junta prismática localizada no braço anterior do efetuador. Um exemplo pode ser observado na Figura 2.4.

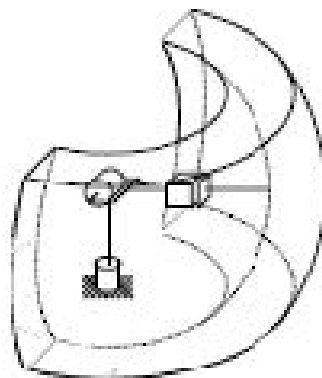


Figura 2.4 - Espaço de trabalho de um manipulador esférico (SPONG, HUTCHINSON e VIDYASAGAR, 2006).

- Manipulador *Scara*: é um equipamento que possui duas juntas rotacionais e uma junta prismática. Diferente do manipulador esférico, suas juntas rotacionais possuem eixos paralelos de rotação e de movimento linear. Outra característica desse tipo de manipulador são os eixos das juntas de ombro e cotovelo. Estes eixos são verticais, dispensando a necessidade de compensação da ação da gravidade sobre sua estrutura. Um exemplo deste manipulador pode ser observado na Figura 2.5.

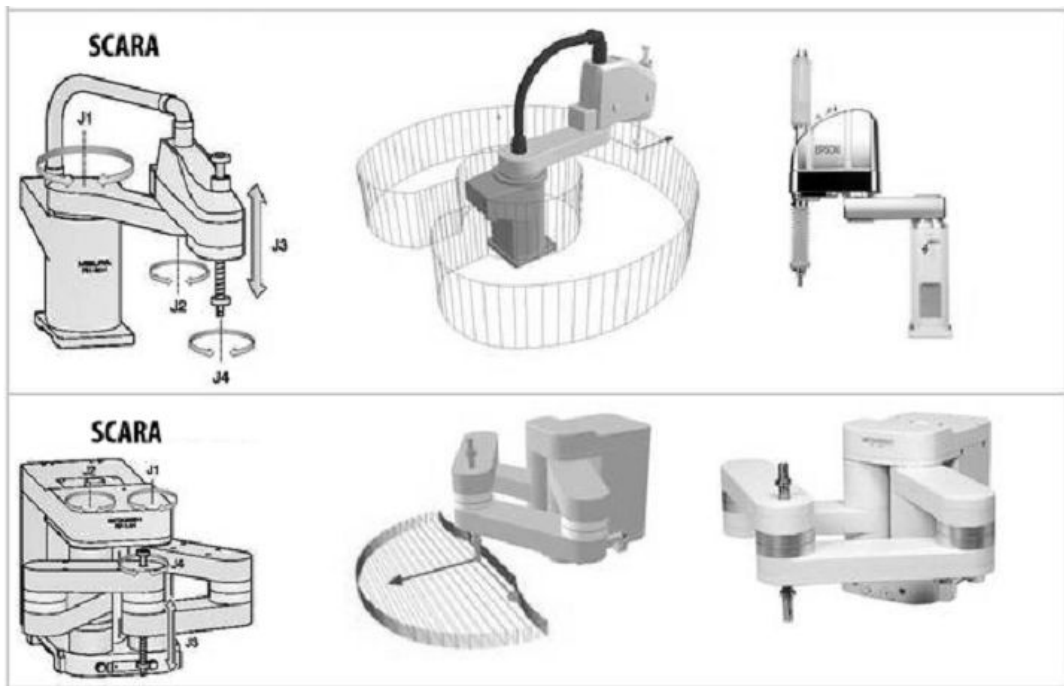


Figura 2.5 - Exemplos de manipulador *Scara* (IFR, 2014).

- Manipulador cilíndrico: possui uma junta rotacional na cintura e duas juntas dotadas de atuadores lineares ortogonais. Um exemplo pode ser observado na Figura 2.6.

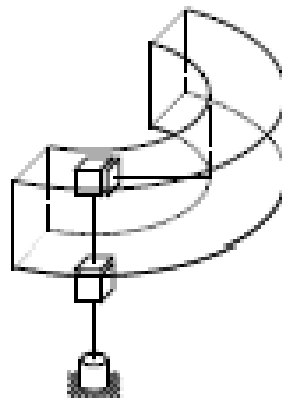


Figura 2.6 - Esquema de um manipulador cilíndrico (SPONG, HUTCHINSON e VIDYASAGAR, 2006).

- Manipulador cartesiano: possui três juntas prismáticas ortogonais entre si. Como variáveis, possui as coordenadas finais após a execução do movimento rotacional com relação à base do manipulador.

- Manipulador paralelo: é formado por duas plataformas, sendo uma base fixa e uma base móvel, ligadas por duas ou mais cadeias cinemáticas abertas de forma independente.



## 2.3 APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

De acordo com Jazar (2010), independente do seu tamanho, os robôs podem ser classificados por sua aplicação. Na indústria são classificados em categorias, podendo-se citar máquina de carga, *pick and place* (pegar e colocar), máquina de soldagem, pintura, montagem, inspeção, amostragem, linhas de manufatura, linha biomédica, equipamento para assistência, equipamentos remotamente controlados e tele-robôs.

Segundo Jazar (2010), com relação às características de *design*, a maioria dos robôs industriais são braços antropomórficos, por possuírem um ombro (duas primeiras juntas), um braço (terceira junta) e um punho (três últimas juntas). Com isso, permitem seis graus de liberdade necessários para colocar um objeto em qualquer posição e orientação.

Segundo Jazar (2010), a maioria dos manipuladores das linhas de montagem tem apenas juntas rotacionais. Comparados às juntas prismáticas, juntas rotacionais possuem menor custo e caracterizam-se pela maior destreza no espaço de trabalho para um mesmo volume ocupado. Esses robôs são muito pesados com relação à maior carga que podem mover sem perder a precisão. Usualmente, a relação de carga *versus* peso é menor que 10%. Esta condição é requerida devido à necessidade de rigidez da estrutura do manipulador. Exemplos destes manipuladores podem ser observados na Figura 2.7 e na Figura 2.8.

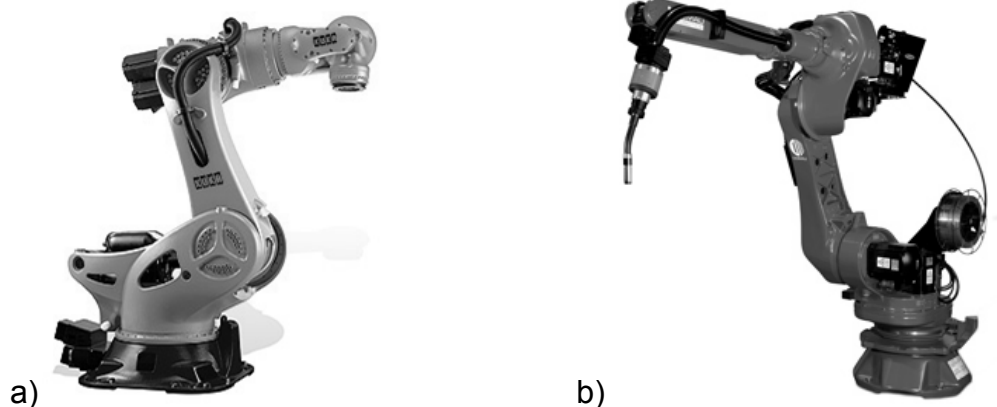


Figura 2.7 - a) Robô de propósito geral modelo KR1300PA (KUKA, 2014);  
b) Robô para soldagem modelo *Smart5 Arc4* (COMAU, 2014).



Figura 2.8 - Utilização de robô cirurgião na medicina (REVISTA ISTO É, 2014).

## 2.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MANIPULADORES

Segundo Neto, Rolim e Pinto (2012), a avaliação de desempenho é uma condição para a verificação da capacidade do manipulador robótico de desenvolver as funções para as quais foi construído. Dessa forma, a quantificação dos desvios que ocorrem entre uma postura comandada (orientação e posição do efetuador), com relação a uma postura alcançada (exatidão) e a flutuação na postura alcançada numa série de repetidas visitas à postura comandada (repetibilidade), descreve o desempenho dinâmico do equipamento durante a realização de uma trajetória (ISO 9283:1998, 2009).

Por meio desses parâmetros pode-se averiguar a adequação para a realização de uma determinada tarefa ou examinar a necessidade de manutenção, como também selecionar-se o aparato mais apropriado para a realização de determinada atividade.

Para a aplicação do manipulador robótico em tarefas específicas, a norma ISO-9283:1998 (2009) sugere que a quantificação da exatidão seja realizada pela tendência de postura, pela variação multidirecional na tendência de postura e pela tendência de distância do equipamento. A repetibilidade deve ser obtida pela medição da postura e pela medição da distância. Os desvios de exatidão e repetibilidade ao longo do tempo devem ser determinados pelo deslocamento e pelas características e/ou tendências de postura.

A postura é o resultado das combinações das posições e orientações de cada elo do manipulador, representado pela posição e orientação de um ponto conhecido no efetuador (ISO 9283:1998, 2009). A posição é expressa em valores

das três coordenadas cartesianas (X, Y e Z) e por sua orientação. Também é determinada pelos valores dos ângulos de rolamento (*roll*), arfagem (*pitch*) e pelo ângulo de guinada (*yaw*) em torno dos eixos das coordenadas cartesianas.

Os parâmetros avaliados variam de acordo com a velocidade e carga aplicada no órgão terminal e pela influência de cada junta do manipulador durante o percurso ao longo do espaço de trabalho (NETO, ROLIM e PINTO, 2012). Assim, os fatores críticos serão determinados pelo espaço de trabalho, velocidade e carga aplicada no órgão terminal.

As condições de realização da avaliação de desempenho seguem as regras da norma ISO TR 13309 (1995), que apresenta as recomendações, o sistema de medição, os métodos e os critérios dos testes. Esta norma sugere um sistema de verificação utilizando uma máquina de medição de coordenadas (MMC) e um dispositivo com dimensões conhecidas, instalado no órgão terminal do manipulador robótico.

## **2.5 TRANSMISSÕES MECÂNICAS DE MANIPULADORES ROBÓTICOS**

De acordo com Padoin, Menuzzi e Valdiero (2010), existem duas formas de acionamento para juntas mecânicas. Uma é o acionamento direto (*direct drive*), onde o motor é montado diretamente no eixo da junta. Esta montagem não é considerada ideal para ser realizada com motores elétricos, pois ocorre a ausência de uma relação de redução, o que leva à necessidade de motores especiais com menor rotação e maior torque, além de sujeitá-lo aos efeitos dinâmicos do acoplamento. Outro tipo de acionamento utiliza a montagem através de transmissões por engrenagens entre motores e juntas, permitindo menores cargas no motor, maiores rotações e facilidade de posicionamento no braço do robô. Como desvantagem esta montagem pode gerar atrito e folga entre as engrenagens de transmissão.

Segundo Padoin, Menuzzi e Valdiero (2010), no projeto e construção de um robô industrial, existem vários elementos que podem ser utilizados como transmissão de potência mecânica. Transmissões mecânicas têm como objetivo conduzir a potência mecânica da fonte de geração até a fonte de utilização, neste caso a carga. Ao optar por um tipo de transmissão, deve-se levar em conta a potência transmitida, os tipos de movimentos realizados e o posicionamento da fonte de potência com relação à junta rotativa ou prismática presente no

equipamento. Além disso, deve-se observar a resistência do material, a eficiência e a relação custo benefício.

Padoin, Menuzzi e Valdiero (2010) afirmam que a relação ótima para uma transmissão por engrenagens depende de muitos fatores, podendo-se citar a velocidade de entrada, as folgas, a eficiência e o fator custo. Na maioria dos casos, transmissões de menor custo têm maiores folgas. Assim, deve-se optar pelo fator custo ou pela compensação da não-linearidade das folgas através do sistema de controle do equipamento.

Nos manipuladores robóticos não linearidades, a zona morta, as folgas e o fenômeno de histerese são considerados eventos típicos, pois são ocorrências características de sistemas mecânicos, hidráulicos, pneumáticos e eletromagnéticos. Esses fenômenos vêm dificultando o desempenho dos sistemas de controle ao longo dos anos, devido ao fato de que as tarefas realizadas por manipuladores de linhas de montagem requerem precisão e repetibilidade nos movimentos desejados. A Figura 2.9 demonstra um exemplo de folga encontrado em engrenagens, onde  $\theta_1$  e  $\theta_m$  representam o sentido de rotação das engrenagens motora e movida, respectivamente.

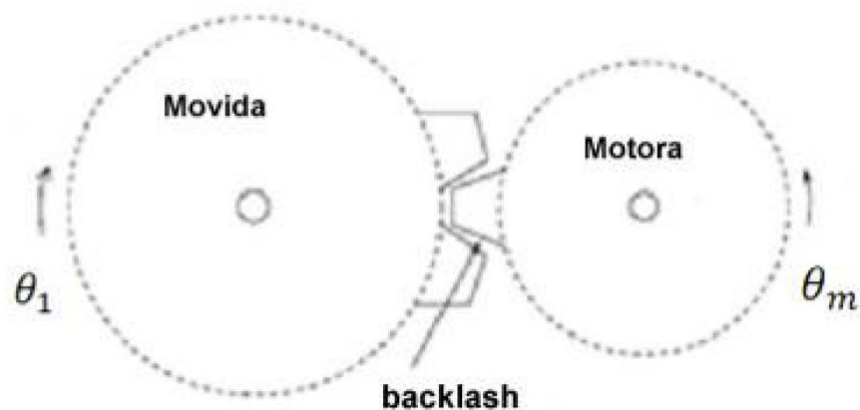


Figura 2.9 - Folga *backlash* num par de engrenagens (PADOIN, MENUZZI e VALDIERO, 2010).

## 2.6 DINÂMICA DO MANIPULADOR

Segundo Ferreira (2000), a dinâmica de um manipulador está relacionada com a cinemática dos corpos que formam a cadeia e as forças aplicadas nas juntas através dos atuadores instalados.

Para o estudo da dinâmica de manipuladores existem duas abordagens geralmente utilizadas: a dinâmica vetorial e a dinâmica analítica. A primeira é baseada na aplicação das Leis do Movimento de *Newton*, que se concentra nos movimentos e forças associadas às partes individuais do sistema e nas interações entre estas partes. Já a segunda, abrange todo o sistema de forma única e utiliza funções escalares descritivas, como as energias cinéticas e potencial.

Para um manipulador genérico com  $n$  graus de liberdade e vetor de juntas  $q(t)$ , a equação dinâmica pode ser expressa conforme descrito na Equação 2.1.

$$\tau(t) - \Pi(t) = M(q(t)) * \ddot{q}(t) + C(q(t), \dot{q}(t)) * \dot{q}(t) + \tau_v * \dot{q}(t) + \tau_c(q(t) * \dot{q}(t)) + G(q(t)) \quad (2.1)$$

Onde:

$\tau(t)$ - é o vetor de força-torque aplicado nas juntas;

$\Pi(t)$ - é o termo que representa a força-torque externa atuando no enésimo corpo;

$M(q(t))$ - representa a matriz de inércia do manipulador;

$C(q(t), \dot{q}(t))$ - representa o efeito centrífugo e de *Coriolis*;

$\tau_v$ - representa o efeito de atrito viscoso;

$\tau_c(q(t) * \dot{q}(t))$ - representa o atrito de *Coulomb*;

$G(q(t))$ - representa o efeito da gravidade.

O torque total de um motor pode ser modelado considerando-se a influência de dois termos: o torque de acionamento ( $T_a$ ) e o torque dinâmico ( $T_{din}$ ). O torque total ( $T_T$ ) é dado pela Equação 2.2.

$$T_T = T_a + T_{din} \quad (2.2)$$

O torque de acionamento é o torque necessário para vencer as forças resistentes ao movimento do fuso, sendo descrito pela Equação 2.3.

$$T_a = \frac{F \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot \eta} + M_{RL} \quad (2.3)$$

Onde:

F - é a carga de trabalho [N];

p - passo [m];

$\eta$  - coeficiente de eficiência mecânica (aproximadamente 0,9);

$M_{RL}$  - torque de atrito no rolamento.

O torque dinâmico é o responsável pela aceleração do conjunto associado ao fuso, onde considera-se a inércia de todos os elementos em movimento, expresso na Equação (2.4):

$$T_{din} = (I_{rotor} + I_{Eq}) \cdot \ddot{\theta} \quad (2.4)$$

Onde:

$\ddot{\theta}$  - é a aceleração angular do fuso;

$I_{rotor}$  - é a inércia do rotor;

$I_{Eq}$  - é a inércia equivalente dos elementos em movimento, sendo calculada pela Equação 2.5.

$$I_{Eq} = m \cdot \frac{p^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot \eta} + m_F \cdot \frac{r_F^2}{2} \quad (2.5)$$

Sendo:

m - massa movida [Kg];

$m_F$  - a massa do fuso [Kg];

$r_F$  - é o raio nominal do fuso [m].

Na Figura 2.10 observa-se a representação de uma montagem realizada para obtenção da dinâmica de um manipulador.

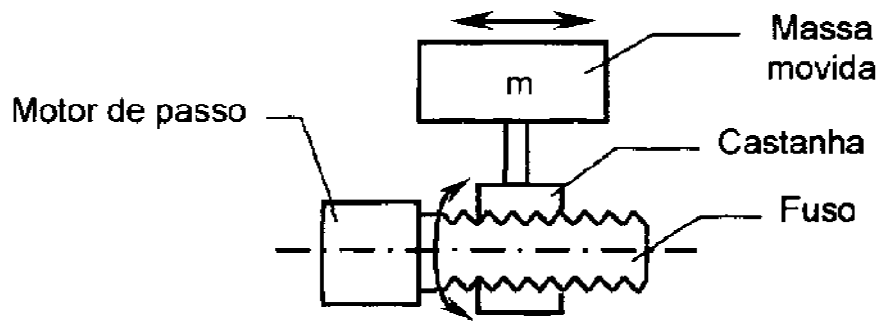


Figura 2.10 - Esquema de movimentação associada ao fuso (FERREIRA, 2000).

## 2.7 MECÂNICA DOS PARAFUSOS DE POTÊNCIA

Segundo Budynas e Nisbett (2011), o parafuso de potência é um dispositivo usado num equipamento para transformar o movimento angular em movimento linear na transmissão do torque. Suas aplicações incluem parafusos de avanço de tornos mecânicos e parafusos para morsas, prensas e macacos. Na Figura 2.11 observa-se um parafuso de potência com rosca quadrada. Seus componentes são representados pelo diâmetro médio ( $d_m$ ), pelo passo ( $p$ ) e pelo ângulo de hélice ( $\lambda$ ). O mesmo está sujeito a uma força axial de compressão ( $F/2$ ).

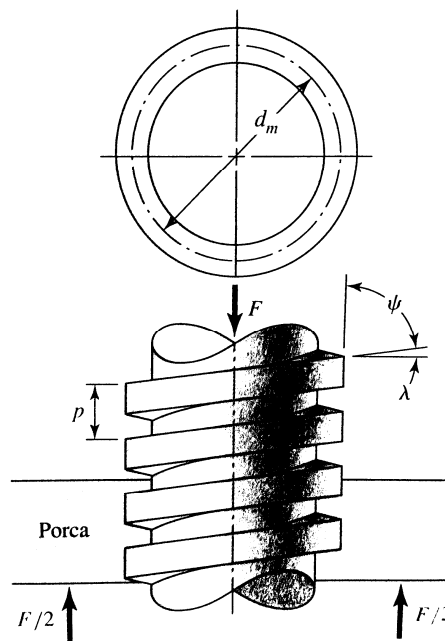


Figura 2.11 - Representação de parafuso de potência (BUDYNAS e NISBETT, 2011).

Para o cálculo do torque requerido para elevar ou descer uma carga deve-se considerar o diagrama de forças mostrado na Figura 2.12.

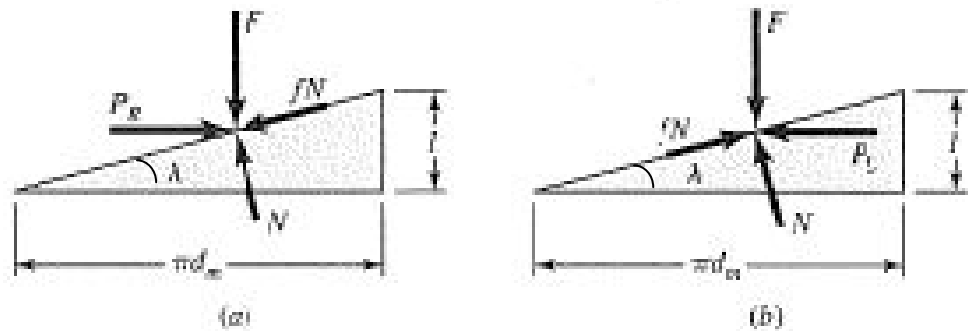


Figura 2.12 - a) Elevação de carga; b) Descimento de carga  
(BUDYNAS e NISBETT, 2011).

Para elevar a carga, uma força ( $P_R$ ) atua para a direita, e para descer a carga, uma força ( $P_L$ ) atua para a esquerda. A força de atrito é o produto do coeficiente de atrito ( $f$ ) pela força normal ( $N$ ), atuando em oposição ao movimento. O sistema está em equilíbrio sob a ação destas forças, assim, para elevar a carga deve-se atender a Equação 2.6 e a Equação 2.7.

$$\sum F_H = P_R - N \sin(\lambda) - fN \cos(\lambda) = 0 \quad (2.6)$$

$$\sum F_V = F + fN \sin(\lambda) - N \cos(\lambda) = 0 \quad (2.7)$$

De maneira semelhante, para descer a carga deve-se atender a Equação 2.8 e a Equação 2.9.

$$\sum F_H = -P_L - N \sin(\lambda) + fN \cos(\lambda) = 0 \quad (2.8)$$

$$\sum F_V = F - fN \sin(\lambda) - N \cos(\lambda) = 0 \quad (2.9)$$

Da solução das Equações 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9, retirando-se a força normal ( $N$ ), obtêm-se a Equação 2.10 e a Equação 2.11.

$$P_R = \frac{F(\sin(\lambda) + f \cos(\lambda))}{\cos(\lambda) - f \sin(\lambda)} \quad (2.10)$$



$$P_L = \frac{F(f \cos(\lambda) - \text{sen}(\lambda))}{\cos(\lambda) + f \text{sen}(\lambda)} \quad (2.11)$$

Considerando-se  $\tan(\lambda) = \frac{l}{\pi d_m}$  e dividindo-se o numerador e denominador das Equações 2.10 e 2.11 por  $\cos(\lambda)$ , obtém-se a Equação 2.12 e a Equação 2.13.

$$P_R = \frac{F\left(\frac{l}{\pi d_m} + f\right)}{1 - \frac{fl}{\pi d_m}} \quad (2.12)$$

$$P_L = \frac{F\left(f - \frac{l}{\pi d_m}\right)}{1 + \frac{fl}{\pi d_m}} \quad (2.13)$$

O torque é o produto da força (P) pelo raio médio ( $d_m/2$ ), expresso na Equação 2.14 e na Equação 2.15.

$$T_R = \frac{F d_m}{2} * \frac{\left(\frac{l}{\pi d_m} + f\right)}{1 - \frac{fl}{\pi d_m}} \quad (2.14)$$

$$T_L = \frac{F d_m}{2} * \frac{\left(f - \frac{l}{\pi d_m}\right)}{1 + \frac{fl}{\pi d_m}} \quad (2.15)$$

Para atuadores lineares é recomendável a utilização de parafuso autoblocante, com torque ( $T_L$ ) maior que zero. Com isso, a condição para autobloqueio pode ser expressa pela Equação 2.16.

$$\pi f d_m > 1 \quad (2.16)$$

O coeficiente de atrito (f) deverá ser maior que  $\tan(\lambda)$ , conforme descrito na Equação 2.17.

$$f > \tan \lambda \quad (2.17)$$

As equações acima foram desenvolvidas para roscas quadradas, onde as cargas de rosca normais estão paralelas ao eixo do parafuso. No caso de roscas modelo *Acme* ou de outros tipos, a carga de rosca normal será inclinada em relação ao eixo devido ao ângulo ( $2\alpha$ ) e ao ângulo de avanço ( $\lambda$ ), conforme mostrado na Figura 2.13.

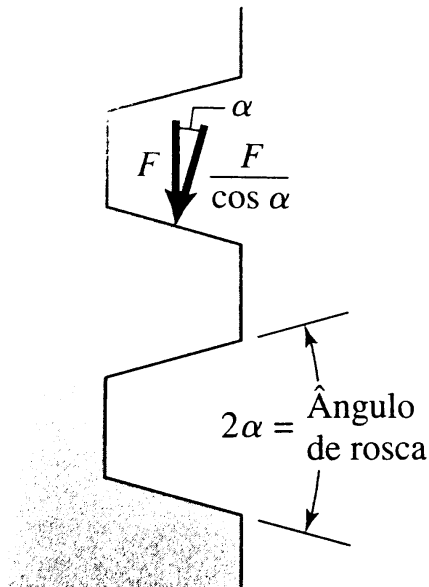


Figura 2.13 - Rosca com carga normal inclinada  
(BUDYNAS e NISBETT, 2011).

O ângulo ( $\alpha$ ) é responsável pelo aumento da força de atrito friccional, através da ação de cunha (calço) presente nas roscas. Com isso, os coeficientes de atrito devem ser divididos por  $\cos(\alpha)$ , obtendo assim a Equação 2.18.

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left( \frac{1 + \pi d_m f \sec \alpha}{\pi d_m - f l \sec \alpha} \right) \quad (2.18)$$

Segundo Budynas e Nisbett (2011), para parafusos de potência, a rosca modelo *Acme* não é tão eficiente quanto às roscas quadradas devido ao atrito adicional proveniente do efeito cunha, porém este modelo é mais empregado devido à facilidade de usinagem, pois permite a utilização de porca bi-partida que pode ser usada para compensar o desgaste do conjunto.

## 2.8 MOTORES DE PASSO E DRIVERS

De acordo com Pawlak (2007), motores de passo são largamente utilizados na indústria. Por exemplo, no setor automotivo são aplicados no mecanismo de entrada de combustível dos motores. No setor metalmeccânico, são utilizados para a movimentação de mesas posicionadoras de fresadoras e de máquinas CNC em geral, como tornos, máquinas de corte a *laser*, a plasma ou oxicorte controladas por computador, impressoras 3D, entre outros.

Motores de passo são classificados em dois tipos, bipolares e unipolares, dependendo do número de bobinas encontradas. Normalmente o tipo unipolar possui quatro bobinas e o bipolar somente duas. A Figura 2.14 representa os esquemas de bobinas de motores de passo unipolares e bipolares.

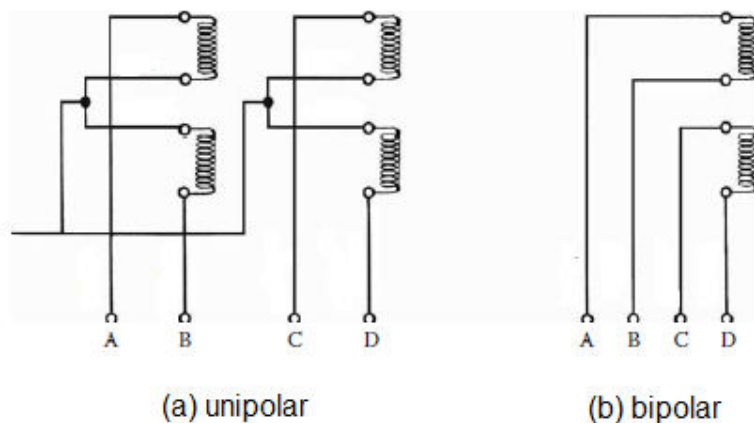


Figura 2.14 - Esquema de bobina para motores de passo (PAWLAK, 2007).

Para um motor unipolar, dois enrolamentos de cada estator são mutuamente excitados. Um controlador unipolar é um microcontrolador que gera uma série de pulsos em sequência, que alimenta por tensão cada bobina do motor de acordo com a ordem dos pulsos. A Figura 2.15 e Figura 2.16 ilustram exemplos de esquemas de ligação do microcontrolador com as bobinas do motor. Também mostram a saída de pulsos para determinada atuação do motor, respectivamente.

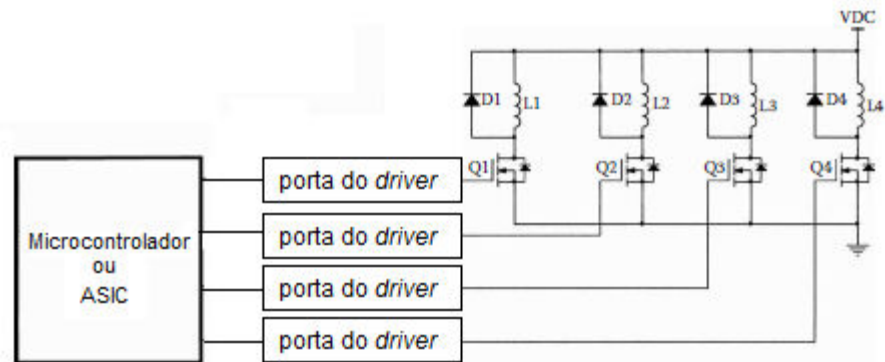


Figura 2.15 - Esquema do microcontrolador/bobinas de um motor de passo (PAWLAK, 2007).

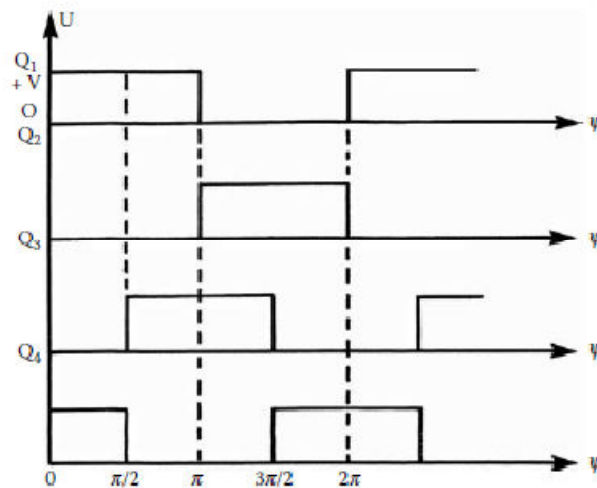


Figura 2.16 - Esquema de saída de pulsos/bobina de um motor de passo (PAWLAK, 2007).

Na Figura 2.15 observa-se que somente duas bobinas podem ser excitadas com mesma tensão e ao mesmo tempo. Com isso, as bobinas adquirem diodos de roda-livre conectados entre si, onde a corrente flui de uma bobina para outra nas etapas de chaveamento da sequência de pulsos. A corrente induzida na fase desligada gera um efeito de amortecimento na resposta do motor, ocorrendo uma diminuição do torque do motor. Segundo Pawlak (2007), mesmo sendo pequena em baixas velocidades, essa diminuição do torque torna-se significativa em altas velocidades. Um *driver* para motores bipolares é mais complexo e caro devido ao uso de mais *mosfets* para chaveamento, quando comparado ao motor unipolar, representado pela Figura 2.17.

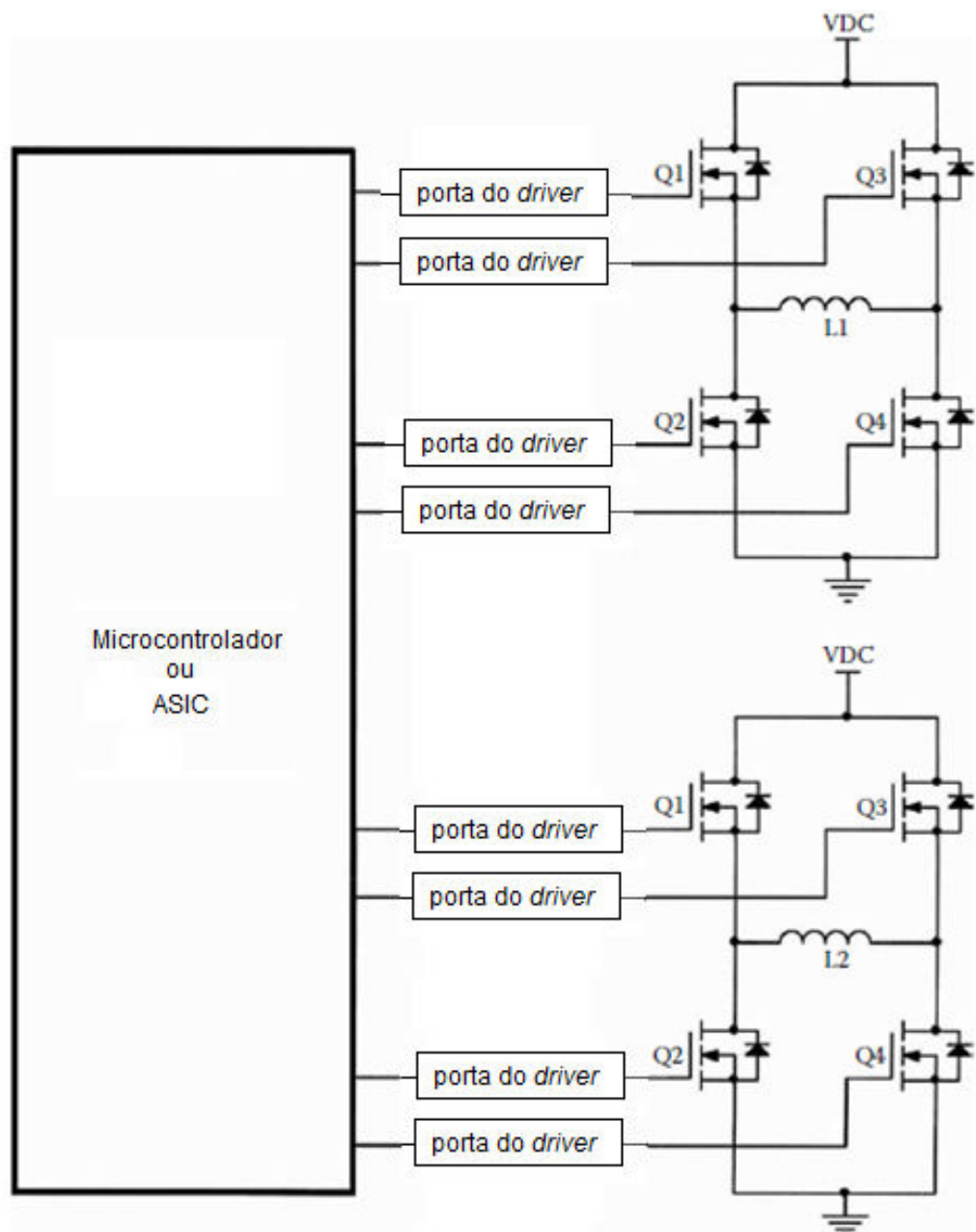


Figura 2.17 - Esquema de ligação de um motor bipolar (PAWLAK, 2007).

No caso do motor bipolar não existe ligação entre as bobinas, com a corrente decaindo rapidamente. A Figura 2.18 ilustra esta ligação.

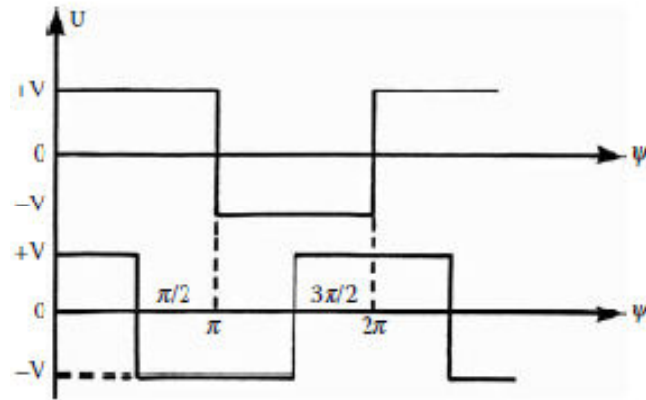


Figura 2.18 - Saída das fases das bobinas de um motor de passo (PAWLAK, 2007).

Como a energia da bobina retorna à fonte de alimentação, o *driver* de um motor bipolar é mais eficiente energeticamente, pois oferece alto torque em altas velocidades, com melhor aproveitamento do motor comparado ao *driver* unipolar.

Para Bishop (2002), o motor de passo é um dispositivo que converte um trem de pulsos de tensão contínua em rotações proporcionais ao seu eixo. Em sua essência, motores de passo são versões discretas de uma máquina síncrona. O movimento discreto desse atuador torna-o ideal para o uso de controle digital via controlador. A velocidade deste motor pode ser variada alterando a largura do trem de pulso de entrada do *driver*. Como exemplo, se um motor de passo requer 48 pulsos para uma revolução completa, um sinal de 96 pulsos por segundo irá causar uma rotação de 120 revoluções por minuto.

Motores de passo são capazes de deslocar cargas de até 2,2 kW, com taxas entre 100-20000 passos por segundo e incrementos angulares entre 0,75-180 graus. Existem basicamente três tipos de motores:

- Motor com relutância variável: este tipo de motor de passo possui um rotor com múltiplos núcleos de ferro macio e fenda única no estator. O número de dentes no rotor e estator, em conjunto com a configuração do enrolamento e excitação, determinam o ângulo de passo. Nessa configuração, o dispositivo pode fornecer de pequenos a médios ângulos de passo, que são capazes de operar com altas taxas de passo. O princípio de operação de um motor de passo pode ser observado na Figura 2.19.

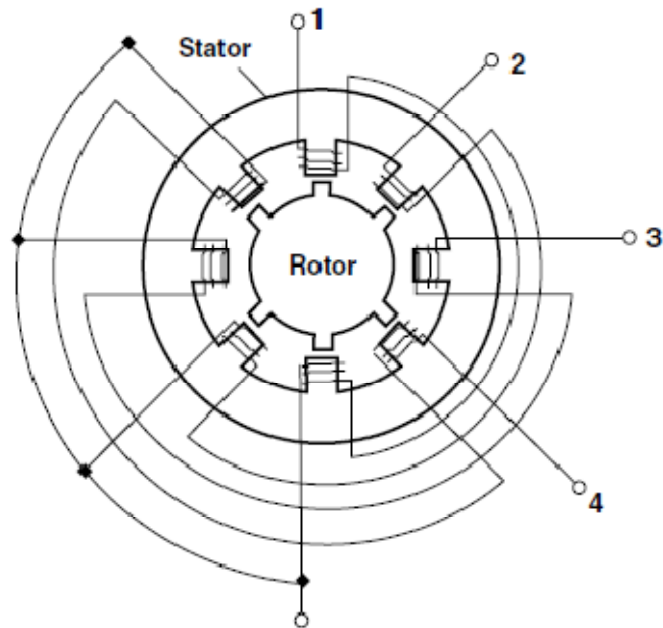


Figura 2.19 - Motor de passo de relutância variável (BISHOP, 2002).

Conforme Bishop (2002), se somente a fase 1 do estator for ativada, dois dentes diametralmente opostos do rotor se alinharão com a fase 1 do dente do estator. O próximo conjunto de dentes adjacentes ao rotor (no sentido horário) estará  $15^\circ$  fora de fase com os dentes do estator. A ativação das fases do enrolamento faz com que o rotor gire mais  $15^\circ$  no sentido anti-horário, para alinhar o par adjacente aos dentes diametralmente opostos do rotor. Se os enrolamentos do estator forem excitados de forma sequencial (1, 2, 3, 4), o rotor move-se em  $15^\circ$  consecutivos na direção anti-horária. Invertendo-se a sequência de excitação a rotação do rotor também será invertida, fazendo o rotor girar em sentido horário.

- Motor com ímã permanente: o rotor usado neste tipo de motor consiste de um ímã permanente montado no rotor. Têm como característica um grande ângulo de passo, compreendido entre  $45-120^\circ$ .

- Motor híbrido: este é a combinação dos dois tipos anteriores. Tipicamente o estator possui oito pólos, sendo energizados por enrolamento bifásico. O rotor consiste de um cilindro magnético magnetizado axialmente. O ângulo de passo depende do método de construção e está geralmente compreendido na faixa entre  $0,9 - 5^\circ$  por passo. O modelo mais encontrado e utilizado possui  $1,8^\circ$  por passo.

Segundo Bishop (2002), devido às características únicas, motores de passo são amplamente utilizados em aplicações que necessitem de posicionamento, controle de velocidade, tempo e atuação sincronizada de mecanismos. Eles são essenciais em *plotters* X-Y, unidades de leitura, unidades de transporte de impressoras, discos de deslizamento de máquinas CNC, caixas automáticas e mecanismos de controle de íris de câmeras.

## **2.9 CONTROLE NUMÉRICO COMPUTADORIZADO**

Para Relvas (2012), considera-se controle numérico todo dispositivo capaz de dirigir os posicionamentos de um órgão mecânico, no qual os comandos relativos a esse movimento são elaborados de forma totalmente automática a partir de informações numéricas ou alfanuméricas definidas, manualmente ou por intermédio de um programa.

Segundo Smid (2008), define-se controle numérico como códigos de uma operação de máquina ferramenta que traduzem instruções para o controle do sistema da máquina.

De acordo com Relvas (2012), a linguagem de programação CNC consiste num conjunto de regras e convenções definidas por símbolos ou caracteres, utilizados para a representação e comunicação de dados entre pessoas e máquinas. Um programa numérico compreende todo o conjunto de dados que o controle necessita para o manuseio da peça. Estes dados têm de ser indicados ao controle da máquina numa linguagem que seja interpretada corretamente pela mesma.

Existe uma diferença com relação às abreviações CN e CNC. O sistema CN usa funções lógicas fixas, as quais são aplicadas permanentemente pela unidade de controle para uso repetitivo. Esse tipo de programação não pode ser modificada pelo programador da máquina. Já o CNC usa um microcontrolador interno, onde encontram-se os registros de uma variedade de rotinas que são capazes de manipular funções lógicas. Isso significa que o programador da máquina pode mudar qualquer programa da unidade de controle, obtendo resultados em tempo real. Segundo Smid (2008), essa flexibilidade é considerada como vantagem do CNC com relação ao CN e, provavelmente, o elemento chave na contribuição do crescimento desse sistema na tecnologia moderna de manufatura.



Segundo Witte (1998), uma máquina CN tem como particularidade a troca de informações entre as partes móveis, que são fornecidas com dados de controle numérico. Em relação a custos, este tipo de equipamento é naturalmente mais caro. Seu valor poderá ser reduzido optando-se por diferentes tipos de dispositivos sem comprometer as funcionalidades da máquina.

De acordo com Silva (2008), a linguagem G foi adotada pelo sistema *ISO* como um padrão de utilização pelos fabricantes de comandos, com algumas normas rígidas. Porém, para alguns comandos existe a liberdade de customização, mantendo as funções básicas e universais (funções que não podem ser definidas de maneiras diferentes, que devem ter a mesma finalidade em todos os comandos). A possibilidade de serem diferentes dentro de um mesmo sistema aumentou a criatividade entre os fabricantes. Dessa forma, alguns comandos oferecem mais recursos que outros.

A linguagem *ISO* possui conjuntos de comandos com funções específicas para certos tipos de tarefa a serem realizadas, como as funções G, M, F, T.

As funções G correspondem aos comandos de movimento do equipamento, considerados na preparação e na realização de tarefas. As funções do tipo M são comandos relacionados ao acionamento do equipamento e periféricos. Algumas destas funções podem ser observadas no Anexo 1.

As funções F correspondem ao avanço do equipamento em mm/rotação ou mm/minuto, determinando o limite de aceleração do equipamento. A função T é utilizada para selecionar ferramentas informando à máquina seu ponto de zeramento, raio do inserto, sentido de corte e corretores. O código T também comanda a troca de ferramentas. É formado por quatro dígitos, sendo os dois primeiros responsáveis pela localização da ferramenta na torre e os dois últimos pelo corretor de ajustes de medidas e correções de desgaste do inserto.

### 3- METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os materiais e os métodos utilizados na realização deste projeto.

#### 3.1 SOFTWARE E HARDWARE

O projeto do protótipo foi desenvolvido utilizando-se o *software SolidWorks* versão 2014. Os desenhos de fabricação encontram-se no Apêndice 1. Com essa ferramenta tornou-se possível a visualização das possíveis interferências entre componentes e a simulação dos esforços mecânicos do conjunto, como tensões de cisalhamento, flambagem de eixos-guia, deslocamentos do sistema de guias, entre outros. Parte das simulações realizadas encontram-se no Apêndice 2. O modelo em 3D do protótipo é mostrado na Figura 3.1.

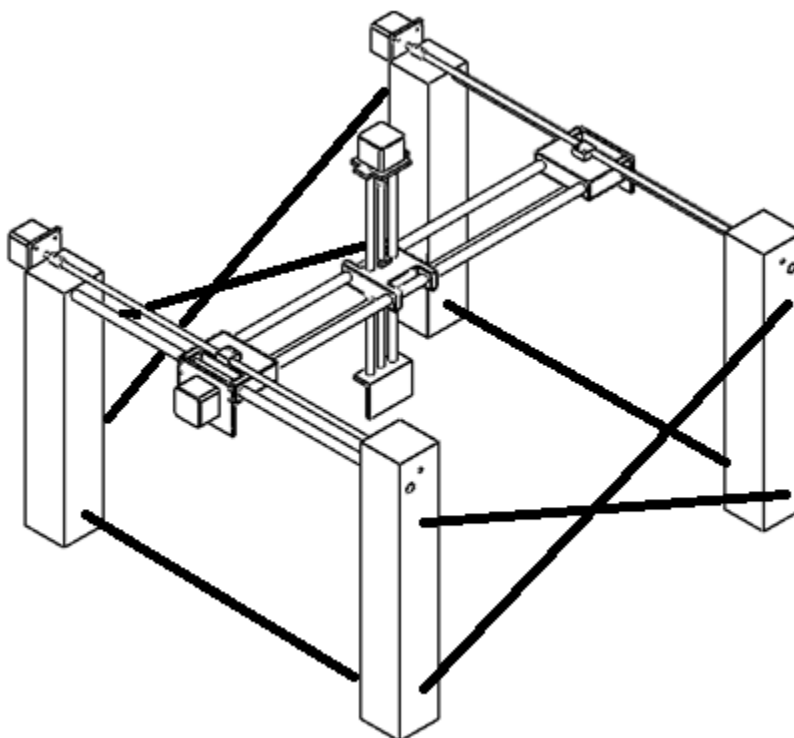


Figura 3.1 - Modelo em 3D do protótipo.

Optou-se por utilizar o código de programação *ISO*, com linguagem de programação parametrizada para realizar a movimentação dos eixos coordenados. Para a implantação do código G no protótipo foi utilizada uma placa *Arduino UNO-R3*, que realizou a comunicação entre os *drivers Pololu A4988*,

responsáveis pelo acionamento dos motores de passo e pela movimentação dos eixos X, Y e Z do manipulador. A placa *Arduino UNO-R3* foi alimentada com a tensão de saída da porta USB, conforme mostrado na Figura 3.2. A porta USB também foi utilizada para transferência de dados e configuração do *software*.

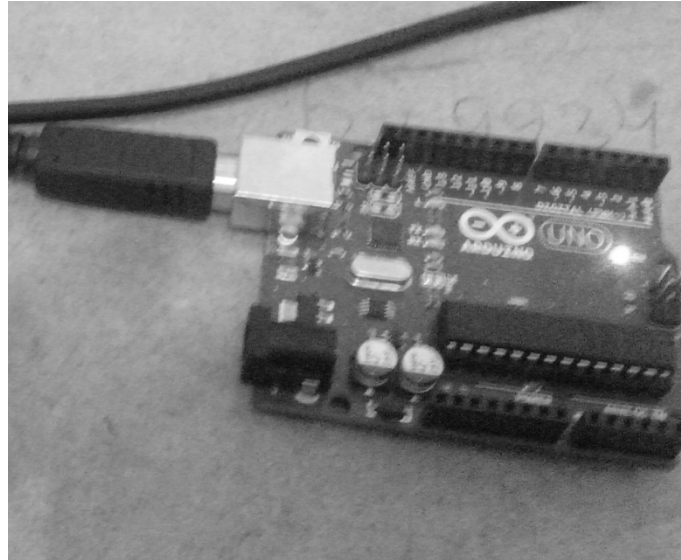


Figura 3.2 - Placa *Arduino UNO-R3*.

O *driver* empregado para o acionamento dos atuadores foi o *Pololu A4988*, utilizado para motores de passo bipolares, conforme mostrado na Figura 3.3.

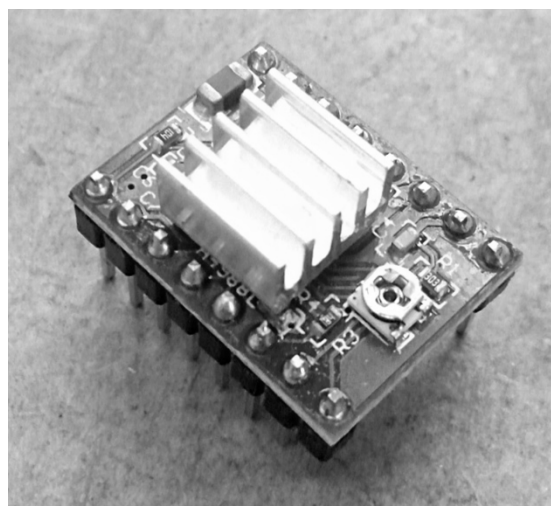


Figura 3.3 - *Driver Pololu A4988*.

Utilizou-se uma tensão de saída igual a 12 V para os motores de passo, tensão encontrada na maioria das fontes de alimentação para computadores.

A corrente dos motores foi regulada de acordo com a Equação 3.1, indicada pelo fabricante dos *drivers*.

$$I_{\text{limite}} = (0.7 \times V_{\text{ref}}) / 2,5 \quad (3.1)$$

A Figura 3.4 mostra o esquema de montagem do *driver* junto ao microcontrolador *Arduino UNO-R3*.

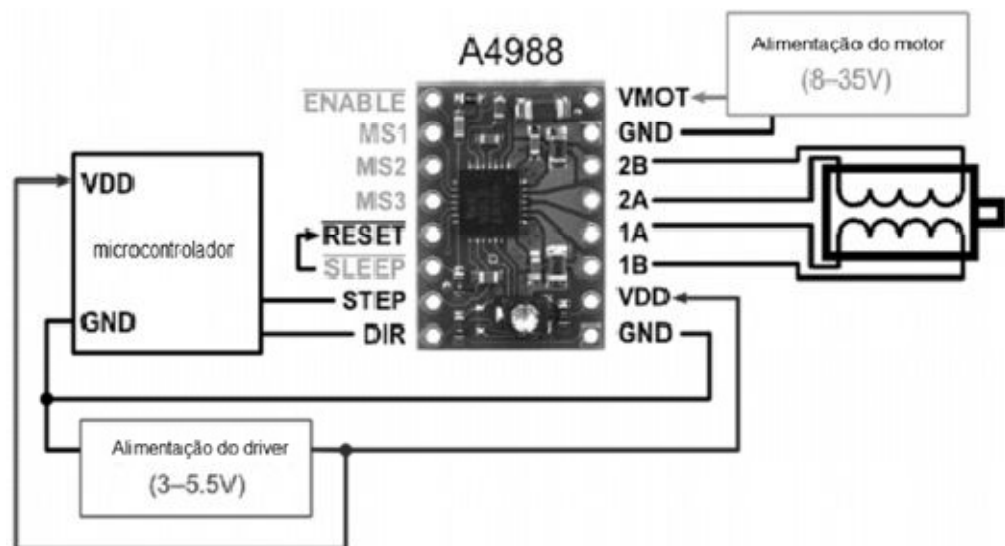


Figura 3.4 - Esquema de conexão do *driver Pololu A4988* (ROBOCORE, 2014).

O *software* utilizado para a comunicação com a placa *Arduino UNO-R3* foi o *Universal G-code Sender*. Este *software* foi configurado com as seguintes informações dos motores:

- 200 passos/mm (todos motores);
- Largura do pulso de passo igual a 30 microssegundos;
- Aceleração de 2 mm/s<sup>2</sup>.

Para o funcionamento e comunicação do programa foi realizado o *upload* do código a ser implantado na placa *Arduino UNO-R3*. O código utilizado neste projeto foi o GRBL na versão 0.8c. O programa utilizado para o *upload* do código foi o *Xloader*.

As saídas selecionadas para o envio de sinais de direção e pulsos de passo para os *drivers Pololu A4988* foram:

- Pino 2 - pulso de passo eixo X;
- Pino 3 - pulso de passo eixo Y;
- Pino 4 - pulso de passo eixo Z;
- Pino 5 - direção eixo X;

- Pino 6 - direção eixo Y;
- Pino 7 - direção eixo Z;
- Pino 8 - liga e desliga *drivers*.

Com as configurações realizou-se a montagem de um *shield* eletrônico para permitir a comunicação com o computador e facilitar o transporte. O diagrama eletrônico dos componentes do *shield* encontra-se no Apêndice 4. O *shield* construído está mostrado na Figura 3.5.

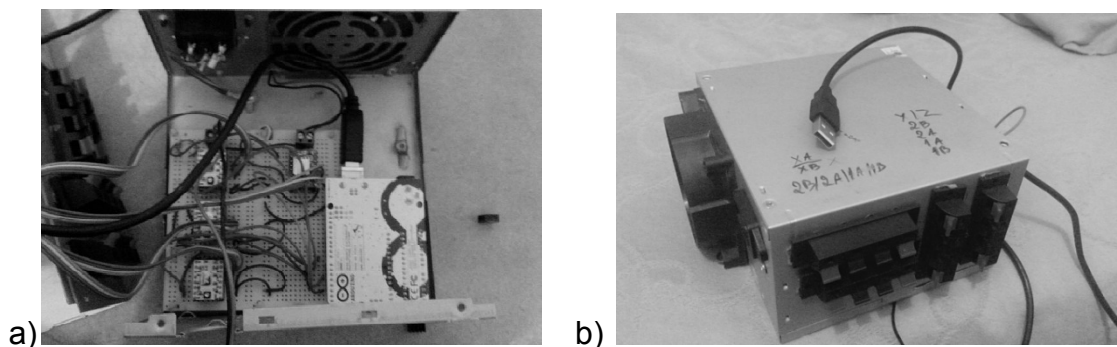


Figura 3.5 - a) Interior do *shield*; b) Exterior do *shield*.

### 3.2 ATUADORES

Os atuadores utilizados foram 4 motores de passo modelo *Nema* 17HD0046, com 2,65 kg.cm de torque em repouso e 0,48 kg.cm de torque máximo em movimento, com tensão aplicada de 12 V, 1,8° por passo, corrente de 1 A, conforme mostrado na Figura 3.6. A memória de cálculo para dimensionamento dos motores de passo encontra-se no Apêndice 3.

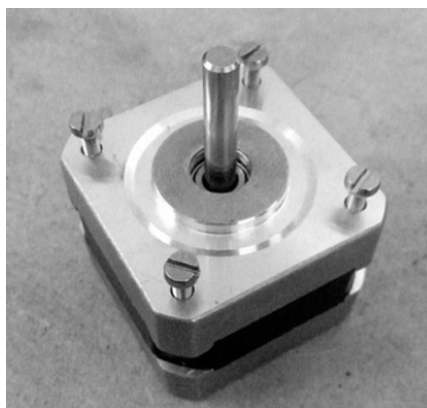


Figura 3.6 - Motor de passo *Nema* 17HD0046.

Os motores foram acoplados ao corpo do protótipo através de eixos roscados. Os eixos possuíam diâmetro de 6,0 mm e rosca com 1,0 mm de passo. Para movimentação dos carros no eixo X utilizaram-se 2 motores montados de maneira sincronizada, de modo a evitar a torção do protótipo em função da diferença de velocidade dos carros laterais. Para os eixos Y e Z utilizou-se 1 motor de passo por eixo.

Para a realização da transmissão de força utilizou-se um bloco metálico com furo roscado, conforme mostrado na Figura 3.7.

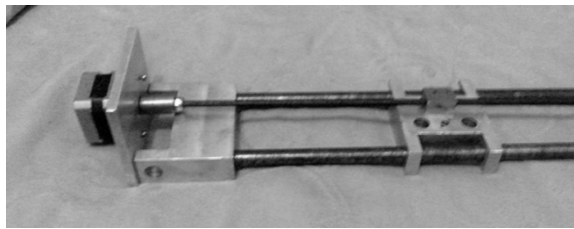


Figura 3.7 - Montagem do eixo de transmissão para atuador linear do eixo Y.

### 3.3 MÁQUINAS UTILIZADAS NA FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO

A usinagem dos componentes foi realizada num torno da marca *Clark* modelo C-18251 e numa fresadora convencional *Nardini Diplomat* 3001 modelo 2200 FVF, conforme mostrado na Figura 3.8.

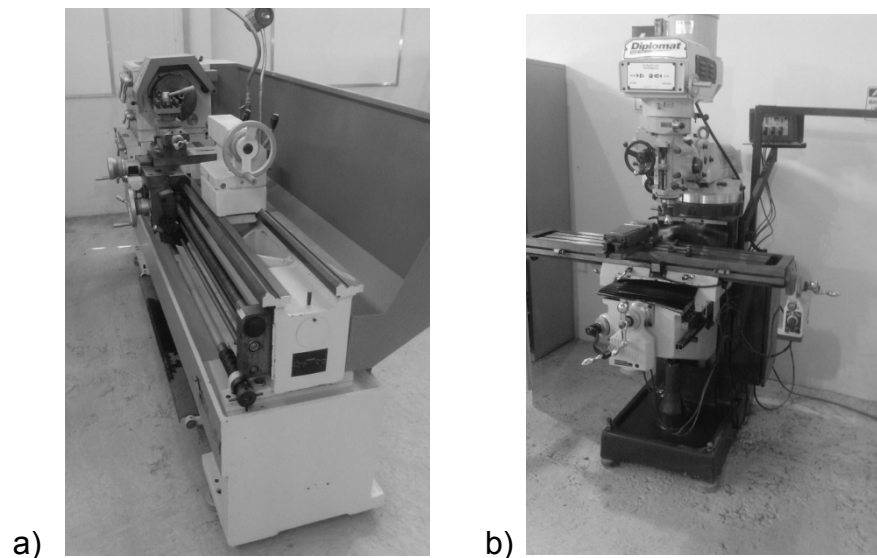


Figura 3.8 - a) Torno *Clark* C-18251; b) Fresadora *Nardini Diplomat* 3001.

### 3.4 COMPONENTES E MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Os eixos utilizados como guias dos carros X e Y foram fabricados em aço ABNT 1020 trefilado, com 12,7 mm de diâmetro e 600,0 mm de comprimento, conforme mostrado na Figura 3.9.



Figura 3.9 - Eixos guia do carro de translação.

Os eixos guia do carro Z foram reaproveitados de impressoras matriciais, também fabricados em aço ABNT 1020, com diâmetro de 11,5 mm e comprimento de 490,0 mm conforme mostrado na Figura 3.10.



Figura 3.10 - Eixos guia do carro Z.

Os parafusos de acionamento dos carros foram obtidos através de barras roscadas comerciais, fabricadas em aço ABNT 1020, com 600,0 mm de comprimento, rosca M6 e passo igual a 1,0 mm. Estes parafusos são mostrados na Figura 3.11.



Figura 3.11 - Parafusos de acionamento dos carros.

Os carros e as placas de fixação foram fabricados em alumínio ABNT 6060. Os desenhos de fabricação podem ser encontrados no Apêndice do trabalho. A Figura 3.12 ilustra as peças usinadas na fresadora. Os furos também foram realizados na fresadora, de modo a garantir precisão e montagem correta.

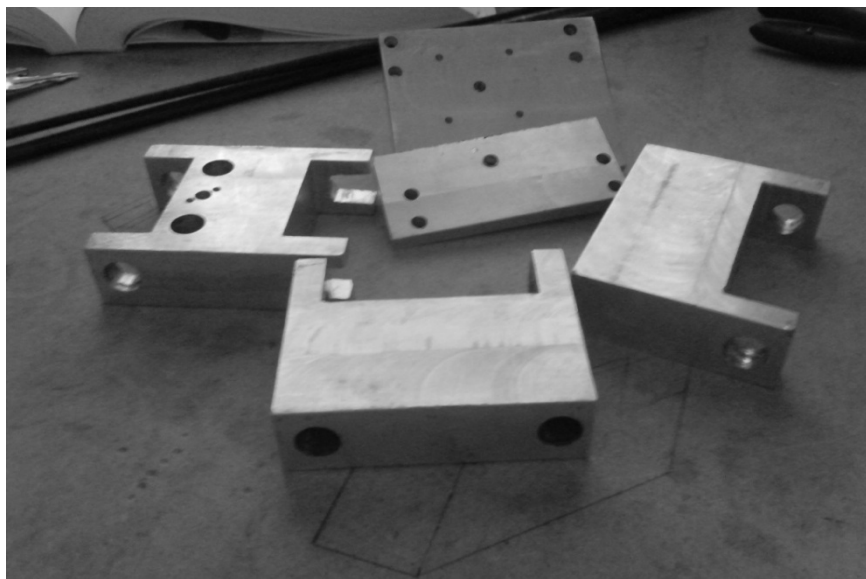


Figura 3.12 - Peças fresadas e furadas prontas para montagem.



As colunas de sustentação do protótipo foram fabricadas em perfil U enrijecido ASTM A36 com dimensões de 40,0 x 76,0 x 390,0 mm, conforme mostrado na Figura 3.13.

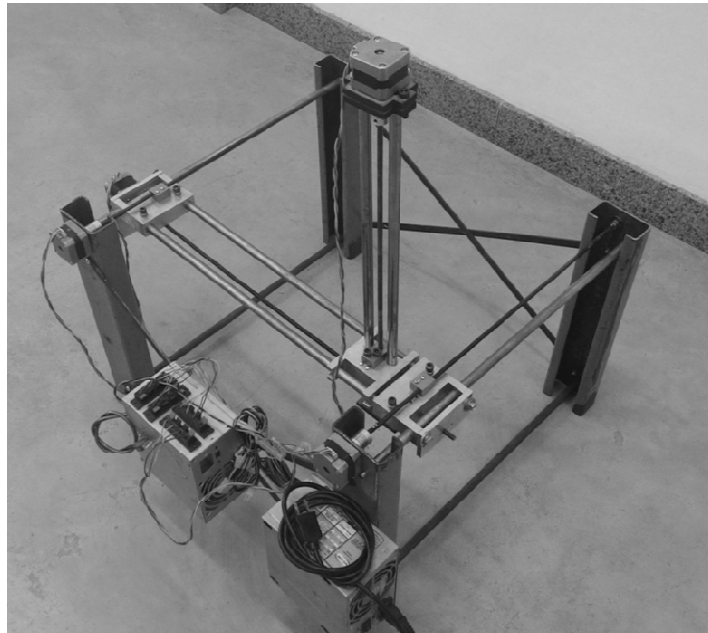


Figura 3.13 - Colunas de sustentação do protótipo.

### 3.4 AQUISIÇÃO DE DADOS

Para avaliar o desempenho do manipulador, foram escolhidos aleatoriamente 20 coordenadas para os eixos X, Y e Z, obedecendo os limites de trabalho do protótipo. Estas coordenadas foram divididas em dois grupos de trabalho (Grupo 1 e Grupo 2), com o objetivo de estudar-se diferentes regiões da área de ação do efetuador. A divisão dos dados em grupos também auxiliou no cálculo e na análise estatística dos valores obtidos.

Como parâmetro inicial de aquisição, adotou-se a coordenada X0 Y0 Z0 como referência para realização das medições nos testes de posicionamento. Para aproximação do efetuador no ponto escolhido, utilizou-se o comando G1 do *software*, que corresponde à movimentação por interpolação linear com avanço programado. Cada posicionamento foi repetido três vezes, com o manipulador saindo sempre da origem pré-estabelecida.

Esta movimentação permitiu que as folgas presentes no conjunto mecânico pudessem ser avaliadas, observando-se assim a capacidade de manter a precisão da posição durante a realização dos movimentos. As coordenadas utilizadas estão listadas na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2.

Tabela 3.1- Coordenadas escolhidas para realização dos testes Grupo 1.

Eixos	Deslocamentos em milímetros									
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
X, Y e Z	10	15	20	33	41	57	64	72	79	81

Tabela 3.2- Coordenadas escolhidas para realização dos testes Grupo 2.

Eixos	Deslocamentos em milímetros									
	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	D19	D20
X, Y e Z	91	112	134	142	153	164	178	189	191	200

Para medição das posições finais do manipulador, utilizou-se um relógio comparador da marca *Mitutoyo*, com resolução de 0,01 mm e curso total de 10,0 mm, fixado ao efetuador. Para aproximação da ponta apalpadora do relógio comparador utilizou-se blocos-padrão da marca *Starett*. Na Figura 3.14 observa-se o método de aquisição de dados utilizado para obtenção das leituras.

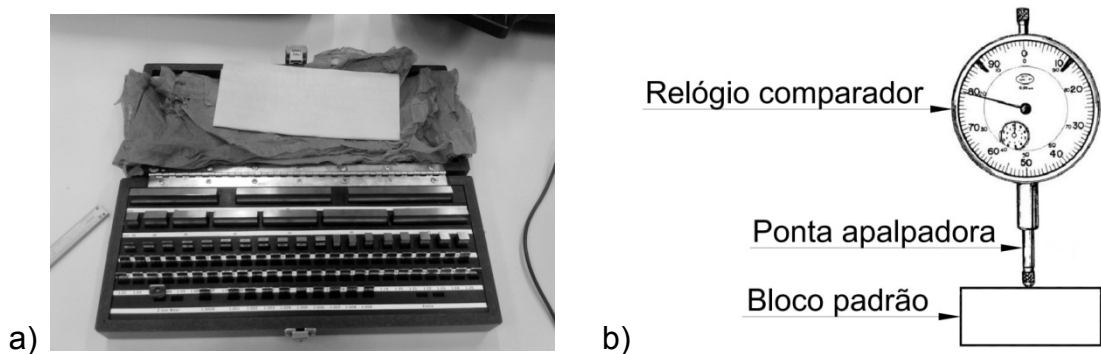


Figura 3.14 - a) Blocos-padrão utilizados nas medições;  
b) Aproximação da ponta apalpadora do relógio comparador.

## 4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE DO POSICIONAMENTO DO MANIPULADOR

Baseando-se nas coordenadas de referência adotadas, foram obtidas as medições do efetuador, representado neste caso pelo relógio comparador. Na Tabela 4.1 observam-se as variações de posição encontradas para os eixos X, Y e Z referentes ao Grupo 1.

Tabela 4.1 - Variações de posição dos eixos coordenados X, Y e Z do Grupo 1.

Eixo	Deslocamento 1			Deslocamento 2			Deslocamento 3			Deslocamento 4			Deslocamento 5		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
X	-0,01	-0,02	-0,03	-0,02	-0,03	-0,02	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	-0,01	0,00
Y	-0,01	0,00	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,03	-0,01	-0,01	-0,03	-0,01	-0,02	-0,03	-0,03
Z	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,01	0,00	0,00	-0,02	-0,01	-0,01	-0,02

Eixo	Deslocamento 6			Deslocamento 7			Deslocamento 8			Deslocamento 9			Deslocamento 10		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
X	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02	-0,03	0,00	-0,01	0,00	0,00	-0,01	-0,02	0,00	0,00	-0,01
Y	-0,02	-0,03	-0,03	-0,02	-0,04	0,00	-0,01	-0,04	-0,03	-0,04	-0,02	-0,05	-0,01	-0,02	-0,03
Z	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01

Na Tabela 4.2 observam-se as variações de posição encontradas para os eixos X, Y e Z referentes ao Grupo 2.

Tabela 4.2 - Variações de posição dos eixos coordenados X, Y e Z do Grupo 2.

Eixo	Deslocamento 11			Deslocamento 12			Deslocamento 13			Deslocamento 14			Deslocamento 15		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
X	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,00
Y	-0,01	-0,02	-0,03	-0,01	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,01	-0,03	-0,02	-0,02	-0,03	-0,02	-0,03
Z	-0,01	0,00	-0,01	-0,02	-0,01	0,00	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	0,00	0,00	-0,01	0,00

Eixo	Deslocamento 16			Deslocamento 17			Deslocamento 18			Deslocamento 19			Deslocamento 20		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
X	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Y	-0,02	-0,03	-0,01	-0,04	-0,03	-0,03	-0,02	-0,04	-0,04	-0,04	-0,03	-0,03	-0,04	-0,02	-0,02
Z	-0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	-0,02	-0,02	-0,01	-0,02	-0,01	-0,01	-0,03	-0,03	-0,04

Na Tabela 4.3 observa-se a análise estatística realizada para as variações de posição do Grupo 1.

Tabela 4.3 - Análise estatística dos dados Grupo 1.

Grupo 1		GL	Média	F(calc.)	F(tab.)	Decisão
Total	0,01	89	-	-	-	-
Deslocamento	0,00	9	0,00	0,61	2,04	Não tem influência
Eixo	0,00	2	0,00	27,11	3,15	Tem influência
Deslocamento x eixo	0,00	18	0,00	2,98	1,78	Tem influência
Erro	0,00	60	0,00	-	-	-

Na Tabela 4.4 observa-se a análise estatística realizada para as variações de posição do Grupo 2.

Tabela 4.4 - Análise estatística dos dados Grupo 2.

Grupo 2		GL	Média	F(calc.)	F(tab.)	Decisão
Total	0,01	89	-	-	-	-
Deslocamento	0,00	9	0,00	2,48	2,04	Tem influência
Eixo	0,01	2	0,00	66,98	3,15	Tem influência
Deslocamento x eixo	0,00	18	0,00	3,72	1,78	Tem influência
Erro	0,00	60	0,00	-	-	-

Analisando-se a Tabela 4.3 observa-se que o deslocamento realizado pelo efetuador não teve influência na repetibilidade das coordenadas escolhidas. No Grupo 1 trabalhou-se com deslocamentos compreendidos entre 10-81 mm, possivelmente a variação do posicionamento não sofreu interferência das folgas mecânicas do conjunto devido à rigidez estrutural. Também notou-se que o comprimento linear percorrido em balanço pelos carros de translação não influenciou na variação dos dados coletados. Porém, através da análise da Tabela 4.3 observou-se que os eixos interferem no posicionamento do efetuador. Através de contraste estatístico notou-se que os eixos Y e Z apresentaram as piores condições para repetibilidade de posição. Supõe-se que as folgas mecânicas da montagem e a necessidade de retorno do efetuador ao mesmo ponto de referência tenham contribuído para variação dos dados obtidos. Com menor distância a percorrer, esperou-se que o efetuador pudesse ter replicado a coordenada de referência com maior precisão, porém esta condição não foi

obtida. O eixo X, diferentemente do eixo Z, possuía dois motores para acionamento. Esta configuração pode ter influenciado no sincronismo dos movimentos, apesar do acionamento dos motores ter sido realizado de maneira simultânea. Apesar do eixo Z possuir apenas um motor de acionamento, observou-se que as folgas presentes no conjunto mecânico foram maiores na sua montagem.

Da análise da Tabela 4.4 observou-se que tanto deslocamento, eixo e suas interações influenciaram a repetibilidade das coordenadas escolhidas. No Grupo 2 trabalhou-se com deslocamentos compreendidos entre 91-200 mm, sendo estes equivalentes ao comprimento máximo de trabalho do manipulador. Devido ao fato de ter ocorrido maior deslocamento linear, notou-se que houve maior dificuldade para movimentação dos carros em função do acoplamento com as barras roscadas e as guias lineares. Através do contraste estatístico notou-se que os eixos X e Y, diferentemente do observado para o Grupo 1, tiveram maior influência nos resultados obtidos. Também observou-se que à medida que os comprimentos lineares aproximaram-se dos valores máximos, o posicionamento do efetuador sofreu influência da distância percorrida. Este comportamento era esperado devido às características mecânicas do sistema, e foi observado através da realização dos ensaios de posicionamento. Possivelmente podem ter ocorrido erros geométricos de fabricação, podendo-se citar erros de forma e erros de posição, que foram capazes de influenciar os resultados à medida que o efetuador distanciou-se do ponto de referência.

Dos eixos analisados, o eixo Z apresentou os resultados menos satisfatórios. O sistema de guias lineares utilizado promoveu interferências no posicionamento do efetuador, apesar da regulação executada para sua movimentação. Notou-se que o sistema de guias adotado possuiu um comprimento insuficiente, permitindo a movimentação lateral enquanto o mesmo percorria deslocamentos na posição vertical. Este fato tornou-se mais evidente à medida que o comprimento linear sofreu acréscimos, provavelmente pelo desbalanceamento de massa ocorrido na movimentação, que foi capaz de influenciar negativamente na obtenção das coordenadas.

Sendo o ponto inicial de referência  $X_0 Y_0 Z_0$  localizado no canto inferior esquerdo do protótipo, observa-se que existe uma concentração de massa neste setor, o que de certa forma, pode ter influenciado de maneira positiva num menor valor de desvio para movimentação do manipulador. Porém, ao distanciar-se do

ponto inicial e devido à maior distância a percorrer, pode ter ocorrido um desbalanceamento de massa que foi capaz de influenciar negativamente na obtenção das coordenadas, ampliando as folgas presentes no conjunto mecânico.

Na Figura 4.1 observa-se o gráfico referente às variações obtidas nos ensaios do Grupo 1.

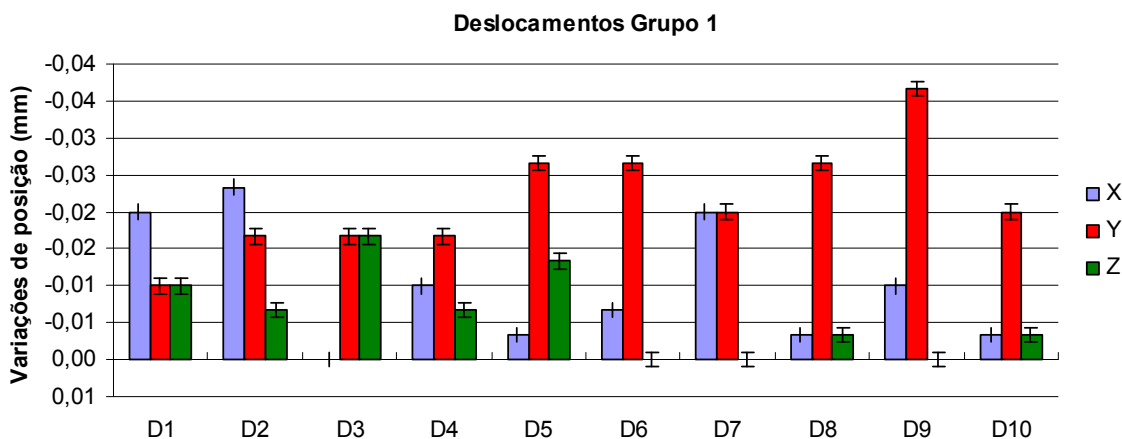


Figura 4.1 - Gráfico das variações de posição Grupo 1.

Na Figura 4.2 observa-se o gráfico referente às variações obtidas nos ensaios do Grupo 2.

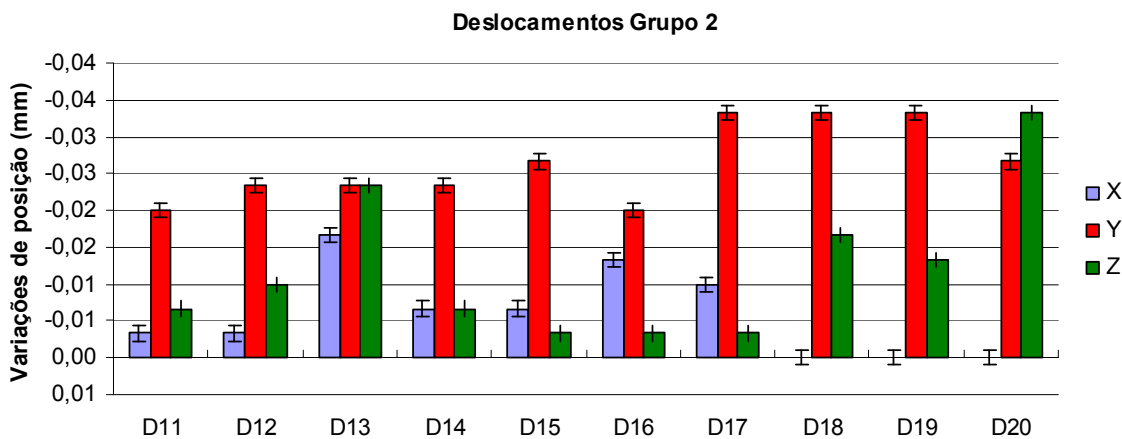


Figura 4.2 - Gráfico das variações de posição Grupo 2.

Da análise da Figura 4.1 do Grupo 1, observa-se que na grande maioria dos deslocamentos o eixo Y e o eixo Z apresentaram as maiores variações dimensionais de posicionamento, conforme discutido na análise estatística. Os valores do eixo X mantiveram-se, na maioria dos casos, abaixo das variações

mais significantes do deslocamento. No gráfico da Figura 4.2 do Grupo 2, os eixos X e Y apresentaram as maiores variações dimensionais na maioria dos casos. A utilização de parafusos de potência com perfil triangular, diferentes do perfil ideal, pode ter contribuído para a ocorrência de folgas no sistema de movimentação. Apesar desta limitação, o perfil triangular é o mais econômico do ponto de vista da fabricação, apresentando folgas compatíveis para montagens de caráter experimental. Para efeito da validação deste projeto, assumiu-se que o perfil atendeu às expectativas de movimentação, o que justificou seu emprego, apesar de suas limitações.

## 4.2 ANÁLISE DA ESTRUTURA MECÂNICA

Na simulação do protótipo, a deformação máxima encontrada apresentou um deslocamento do efetuator igual a 0,363 mm quando este encontrava-se na região central do espaço de trabalho. O maior deslocamento deve-se à maior distância para efetuar a movimentação, e que também poderá sofrer acréscimo dos valores quando o efetuator estiver realizando algum tipo de carregamento. Na Figura 4.3 pode-se observar a análise realizada com auxílio do *software*.

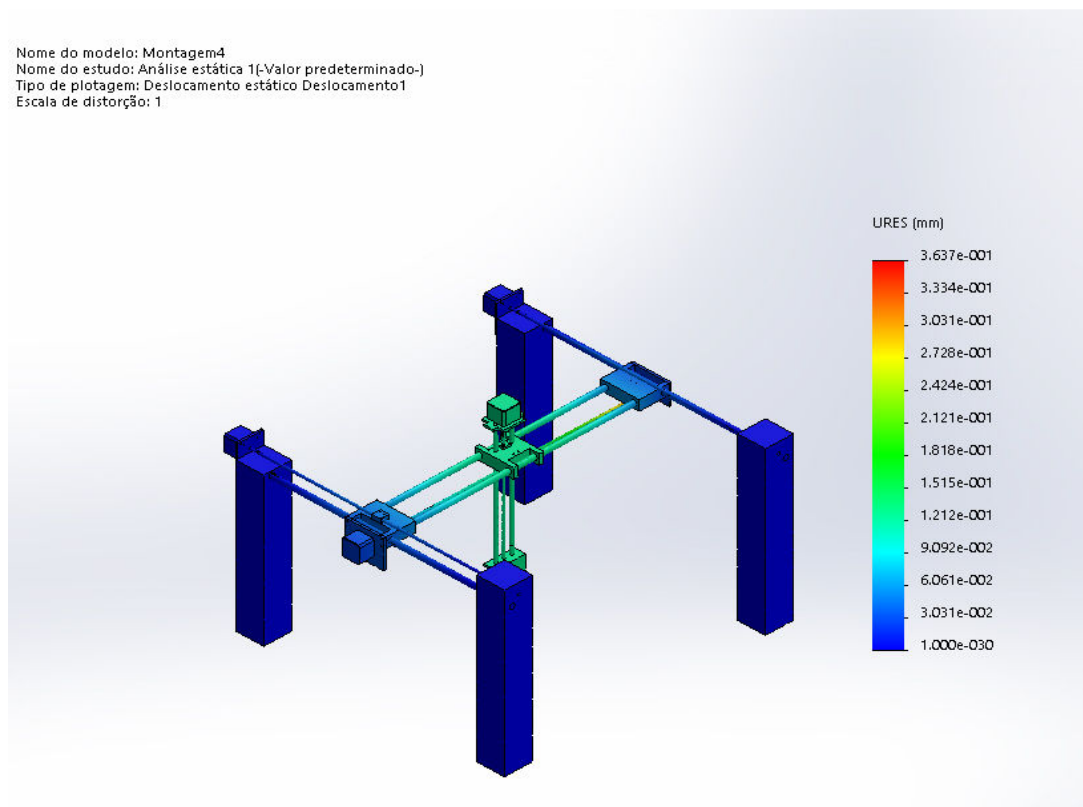


Figura 4.3 - Análise do deslocamento.

Nota-se que esta deformação pode ter influenciado na determinação do posicionamento do eixo Z, apesar do manipulador ter trabalho sempre em vazio. Como visto na Revisão da Literatura, transmissões que possuem menores custos possuem maiores desvantagens e acabam acarretando certa interferência na dinâmica do manipulador. O uso de barras roscadas, apesar de possuírem transmissão satisfatória de movimento acarreta vibrações na estrutura do conjunto mecânico. Isto ocorre devido ao chaveamento dos passos do motor e ao atrito entre a rosca e a castanha, transmitindo a vibração aos carros e ao efetuator. Para atenuarem-se estas vibrações, sistemas de mortecimento das colunas de sustentação poderiam ter sido empregados. As barras utilizadas como guias tiveram um resultado satisfatório quanto à sua aplicação no sistema estudado.

#### **4.3 ANÁLISE DA ELETRÔNICA E ATUADORES**

A utilização do *Arduino Uno-R3* atendeu às necessidades do projeto. A quantidade de portas digitais disponíveis para os atuadores e saídas lógicas do *software* foram suficientes, inclusive houveram portas livres que poderiam ser utilizadas em desenvolvimentos futuros. Os *drivers Pololu A4988* apresentaram boa relação custo benefício no projeto. A simplicidade de programação, baixo custo em relação a produtos similares do mercado e a facilidade de comunicação com outros dispositivos de comando confirmou o motivo de sua crescente utilização em projetos de automação. Os atuadores de passo utilizados demonstraram boa aplicabilidade no protótipo. Tratando-se de um sistema de posicionamento onde as tarefas não exigem aplicações de força, estes limitaram-se a superar o atrito dos componentes e o peso próprio do equipamento, trabalhando sem grandes esforços. A corrente de alimentação foi suficiente para a movimentação dos carros, não necessitando substituição dos motores nem adequação do torque calculado.



## 5- CONCLUSÕES

Com relação ao desenvolvimento de um sistema de movimentação tipo pórtico para aplicações em projetos de robótica pode-se concluir que:

- O protótipo construído apresentou-se boa resposta ao posicionamento mensurado. O posicionamento do eixo X e do eixo Y apresentou melhor repetibilidade quando comparado proporcionalmente à distância de trabalho percorrida.
- A utilização de parafusos de potência com perfil triangular é uma opção satisfatória para sistemas experimentais, porém possui limitações relacionadas à distância de trabalho percorrida.
- O manipulador apresentou repetibilidade satisfatória nos posicionamentos compreendidos entre 10-81 mm, porém obteve repetibilidade comprometida para posicionamentos compreendidos entre 91-200 mm.
- A utilização de motores de passo e microcontroladores de baixa complexidade possibilita a implementação de sistemas de transporte de baixo custo.

## 6- PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se abaixo os seguintes temas para continuidade de desenvolvimento deste projeto:

- Utilização de diferentes tipos de transmissão de potência para movimentação dos carros de translação, como correias, cabos de aço, fuso com castanha de esferas circulantes, a fim de compararem-se os resultados de posicionamento.
- Aplicação de diferentes códigos de controle e posicionamento, como visão computacional, aplicação integrada a *software* CAM, controle em tempo real e comunicação *wireless*.
- Utilização de diferentes tipos de *drivers* de potência e diferentes tipos de motores.
- Implantação de diferentes ferramentas no manipulador, como garras, ferramentas rotativas, eletroímãs, de modo a realizarem tarefas específicas.
- Ampliação dos graus de liberdade do protótipo, adicionando-se outros tipos de juntas no efetuador.
- Aperfeiçoamento do sistema de fixação e movimentação do eixo coordenado Z, de modo a obterem-se menores folgas no conjunto mecânico.

## 7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BISHOP, Robert H. **The Mechatronics HandBook**. 1th ed. Boca Raton: CRC Press, 2002.

BUDYNAS, Richard G. NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley Projeto de Engenharia Mecânica**. 8 ed. São Paulo: Bookman Editora, 2010.

COMAU. **COMAU Group Brasil**. 2014. Disponível em: <[http://www.comau.com/por/offering\\_competence/robotics\\_automation/products/low\\_medium\\_robots/Pages/Smart\\_5\\_Arc\\_4.aspx](http://www.comau.com/por/offering_competence/robotics_automation/products/low_medium_robots/Pages/Smart_5_Arc_4.aspx)>. Acesso em: 22 dez. 2014.

CRAIG, John J. **Introduction to Robotics Mechanics and Control**. 3th ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005.

FERREIRA, Cláudio Violante. **Compensação de Desvios de Posicionamento Para Manipulador Tipo Pórtico**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro, 2000.

IFR. **International Federation of Robotics**. 2014. Disponível em: <<http://www.ifr.org/>>. Acesso em: 22 dez. 2014.

ISO 8373. **Manipulating Industrial Robots**. 2012.

ISO 9283:1998. **Manipulating Industrial Robots - Performance Criteria and Related Test Methods**. 2009.

ISO TR 13309. **Manipulating Industrial Robots - Informative Guide on Test Equipment and Metrology Methods of Operation for Robot Performance Evaluation in Accordance with ISO 9283**. 1995

JAZAR, Reza N. **Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics and Control**. 2th ed. New York: Springer, 2010.

KUKA. **KUKA Robotics Brasil**. 2014. Disponível em: <[http://www.kuka-robotics.com/brazil/br/products/industrial\\_robots/special/palletizer\\_robots/kr1000\\_1300\\_titan\\_pa/start.htm](http://www.kuka-robotics.com/brazil/br/products/industrial_robots/special/palletizer_robots/kr1000_1300_titan_pa/start.htm)>. Acesso em: 20 dez. 2014.

NETO, Ermes Ferreira Costa. ROLIM, Tiago Leite. PINTO, André Murilo de Almeida. Sistemática para Avaliação de Desempenho do Manipulador Robótico Educacional de 5 Graus de Liberdade Utilizando Máquina de Medição por Coordenada para Aplicação em Movimentação de Peças. **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM**. São Luís, 2012.

PADOIN, Eduardo. MENUZZI, Odair. VALDIERO, Antônio Carlos. 2010. Estudo da não Linearidade de Folga nas Juntas de Manipuladores Robóticos. **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM**. Campina Grande, 2010.

PAWLAK, Andrzej M. 2006. **Sensors And Actuators in Mechatronics: Design and Applications**. 1th ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.

RELVAS, Carlos Alberto Moura. **Controlo Numérico Computadorizado: Conceitos Fundamentais**. 3 ed. Porto: Editora Publindústria, 2012.

REVISTA ISTO É. **Robôs na Sala de Cirurgia**. 2014. Disponível em: <[http://www.istoe.com.br/reportagens/12708\\_robos+na+sala+de+cirurgia](http://www.istoe.com.br/reportagens/12708_robos+na+sala+de+cirurgia)>. Acesso em: 22 dez. 2014.

RIA. **Robotic Industries Association**. 2014. Disponível em: <<http://www.robotics.org/>>. Acesso em: 22 dez. 2014.

ROBOCORE. **Robocore Loja Virtual**. 2014. Disponível em: <<http://www.robocore.net/>>. Acesso em: 20 dez. 2014.

ROJAS, Julio. **Apostila de Robótica**. Faculdades ETEP, 2014.

SILVA, Sidnei Domingues. **CNC - Programação de Comandos Numéricos Computadorizados - Torneamento**. 8 ed. São Paulo: Editora Érica, 2008.

SMID, Peter. **CNC Programming Handbook**. 3th ed. New York: Industrial Press Inc., 2008.

SPONG, Mark W. HUTCHINSON, Seth. VIDYASAGAR, M. **Robot Modeling and Control**. 1th ed. New York: John Wiley & Sons, 2006.

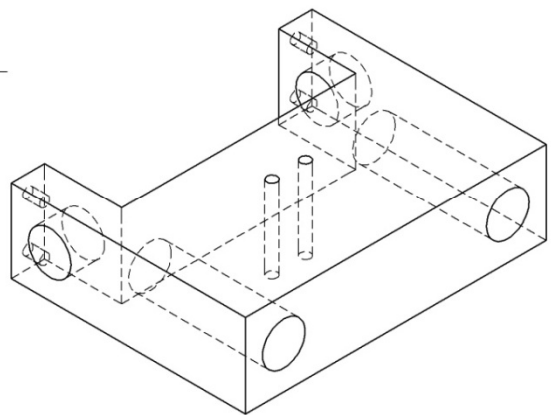
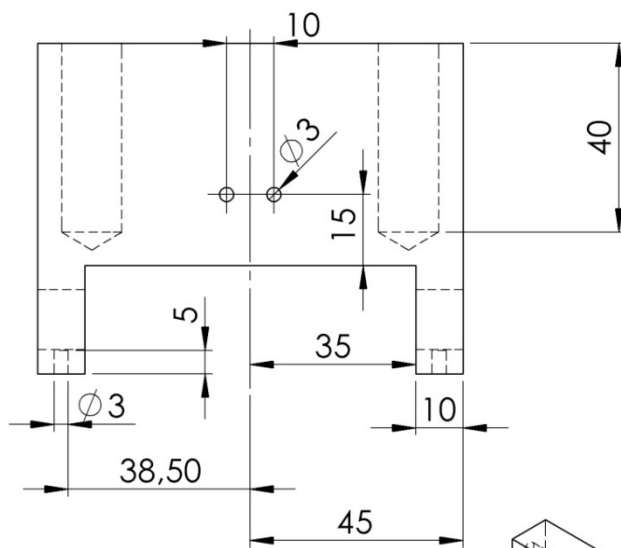
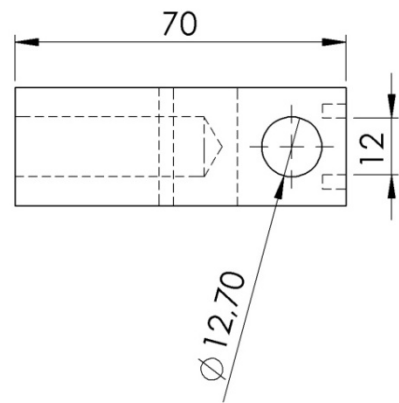
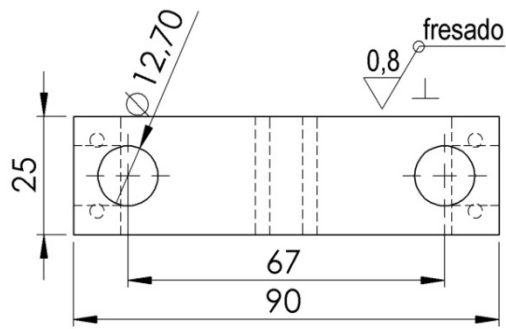
WITTE, Horst. **Máquinas Ferramenta - Elementos Básicos de Máquinas e Técnicas de Construção**. 1 ed. São Paulo: Hemus Editora, 1998.

# APÊNDICE 1

Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	QTD.
1	carrinho xz	1
2	placazcima	1
3	placazbaixo	1
4	guia300mm	2
5	guia600mm	4
6	carrinho xy	2
7	placamotorcarrinho	1
8	rosca	2
9	placamotorcarrinho2	1
10	rosca600mm	2
11	rosca300mm	1
12	motor	4
13	roscaxz	1
14	base2	2
15	placamotorbase	2
16	base	1
17	base3	1
18	rosca460mm	1

Peça: Montagem do protótipo		
Aluno: Walter Campos Souza		
Acabamento:	Material:	Escala: 1:10



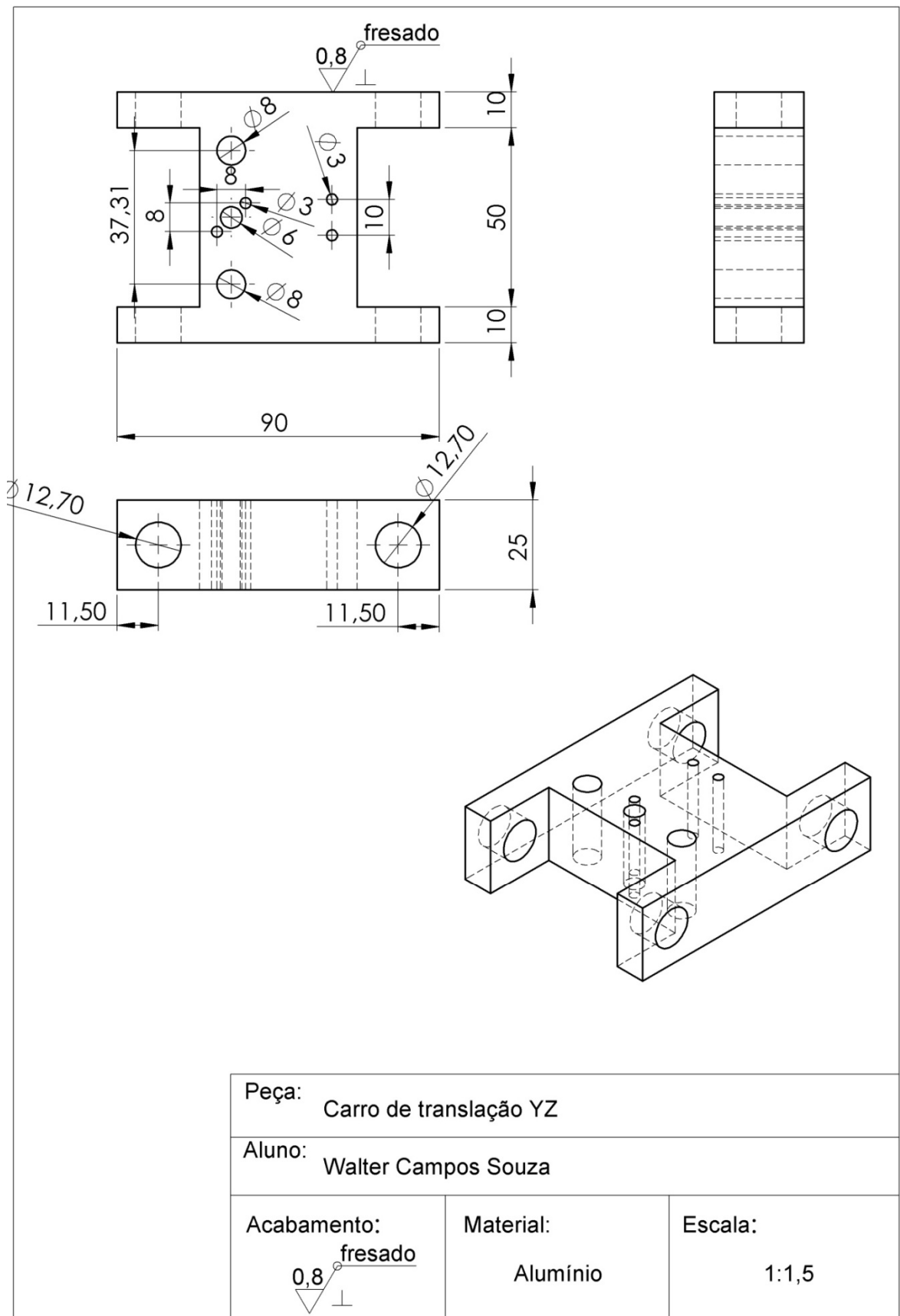
Peça: Carro de translação XY

Aluno: Walter Campos Souza

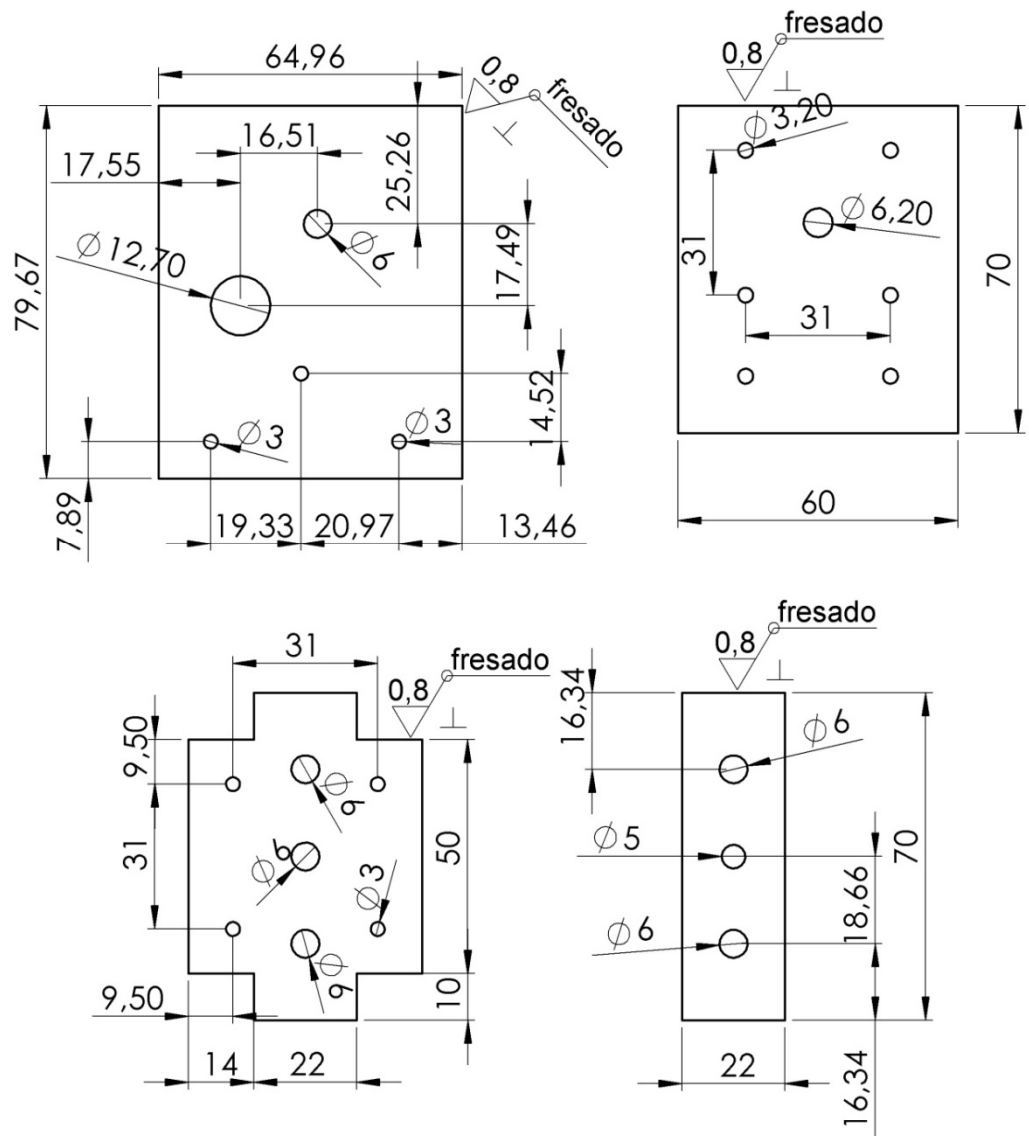
Acabamento:  
fresado  
0,8

Material:  
Alumínio

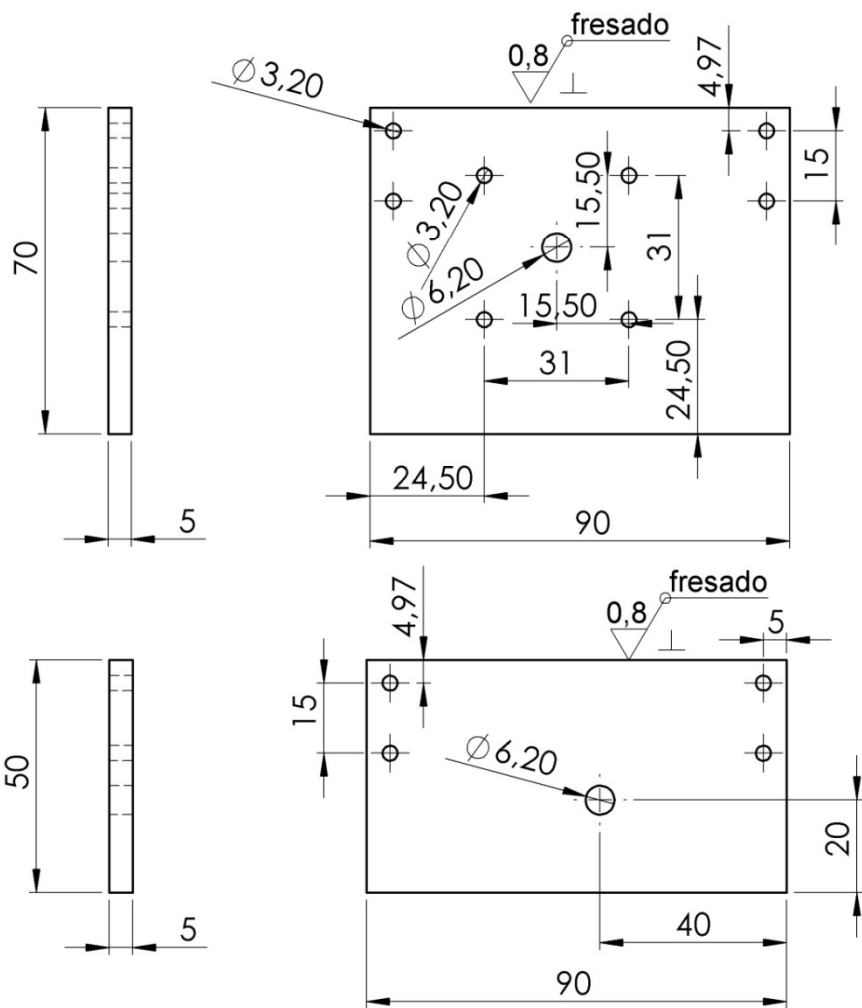
Escala:  
1:1,5

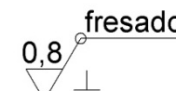


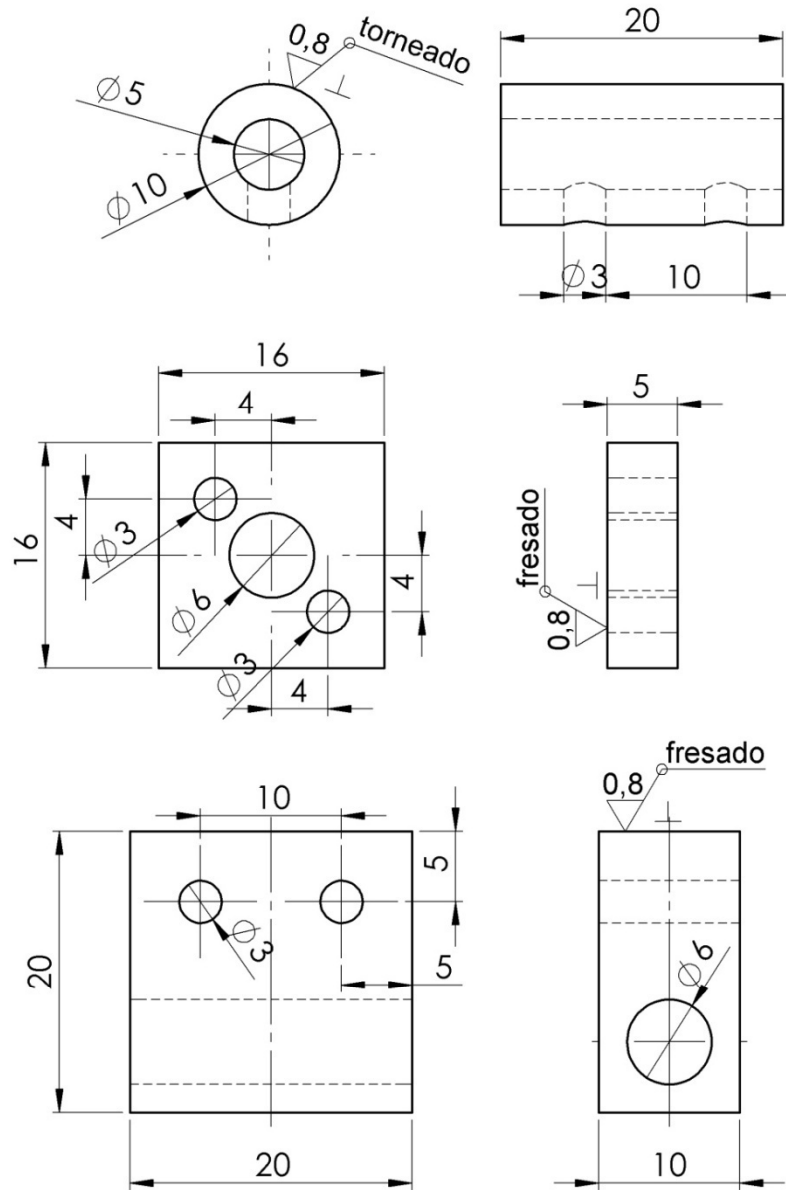




Peça		quantidade
Acoplamento motor Z1		1
Acoplamento motor Z2		1
Acoplamento motor X1		2
Acoplamento motor X2		2
Peça: Placas de acoplamento de motores e eixos guia X e Z		
Aluno: Walter Campos Souza		
Acabamento: 0,8 fresado	Material: MDF #6mm	Escala: 1:1,5



Peça: Placas de acoplamento do motor eixo Y		
Aluno: Walter Campos Souza		
Acabamento: 	Material: Alumínio	Escala: 1:1,5



Peça: Acoplamentos de fusos e castanhas

Aluno: Walter Campos Souza

Acabamento:

Material:

Escala:

Aço ABNT 1020

2:1

## APÊNDICE 2

Tabela A.1 - Dados de componentes.

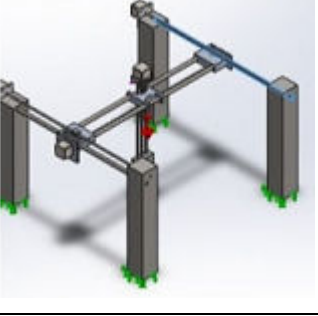
Item	Tratado como	Propriedades volumétricas
<p><b>Corte-extrusão</b></p> 	<p><b>Corpo sólido</b></p>	<p>Massa:12.2055 kg            Volume:0.001545 m<sup>3</sup>            Densidade:7900 kg/m<sup>3</sup>            Peso:119.614 N</p>
<p><b>Corte-extrusão</b></p> 	<p><b>Corpo sólido</b></p>	<p>Massa:0.245716 kg            Volume:9.10059e-005 m<sup>3</sup>            Densidade:2700 kg/m<sup>3</sup>            Peso:2.40802 N</p>
<p><b>Ressalto-extrusão</b></p> 	<p><b>Corpo sólido</b></p>	<p>Massa:0.596648 kg            Volume:7.60061e-005 m<sup>3</sup>            Densidade:7850 kg/m<sup>3</sup>            Peso:5.84715 N</p>
<p><b>Ressalto-extrusão</b></p> 	<p><b>Corpo sólido</b></p>	<p>Massa:0.596648 kg            Volume:7.60061e-005 m<sup>3</sup>            Densidade:7850 kg/m<sup>3</sup>            Peso:5.84715 N</p>

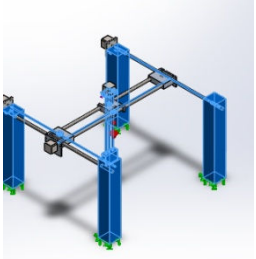
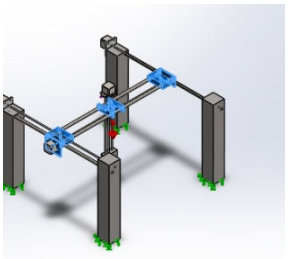
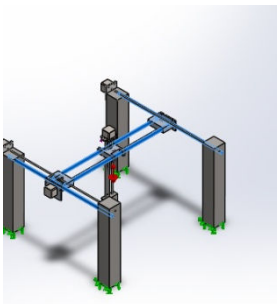
Tabela A.2 - Propriedades de estudo.

Nome do estudo	Análise estática
Tipo de análise	Análise estática
Tipo de malha	Malha sólida
Efeito térmico:	Ativada
Opção térmica	Incluir cargas de temperatura
Temperatura de deformação zero	298 Kelvin
Inclui efeitos da pressão de fluidos do <i>SolidWorks SimulationXpress</i>	Desativada
Tipo de <i>Solver</i>	<i>FFEPlus</i>
Efeito no plano	Desativada
Mola suave	Desativada
Atenuação inercial	Desativada
Opções de união incompatíveis	Automática
Grande deslocamento	Desativada
Calcular forças de corpo livre	Ativada
Atrito	Desativada
Usar método adaptável:	Desativada

Tabela A.3 - Unidades utilizadas.

Sistema de unidades:	SI (MKS)
Comprimento-deslocamento	Mm
Temperatura	Kelvin
Velocidade angular	Rad/s
Pressão-tensão	N/m <sup>2</sup>

Tabela A.4 - Propriedades do material.

Referência do modelo	Propriedades
	<p><b>Nome:</b> AISI 1020</p> <p><b>Tipo de modelo:</b> Isotrópico linear elástico</p> <p><b>Critério de falha predeterminado:</b> Desconhecido</p> <p><b>Limite de escoamento:</b> <math>3.51571e+008 \text{ N/m}^2</math></p> <p><b>Resistência à tração:</b> <math>4.20507e+008 \text{ N/m}^2</math></p> <p><b>Módulo elástico:</b> <math>2e+011 \text{ N/m}^2</math></p> <p><b>Coefficiente de Poisson:</b> 0.29</p> <p><b>Massa específica:</b> <math>7900 \text{ kg/m}^3</math></p> <p><b>Módulo de cisalhamento:</b> <math>7.7e+010 \text{ N/m}^2</math></p> <p><b>Coefficiente de expansão térmica:</b> <math>1.5e-005 \text{ /Kelvin}</math></p>
	<p><b>Nome:</b> Liga 6061</p> <p><b>Tipo de modelo:</b> Isotrópico linear elástico</p> <p><b>Critério de falha predeterminado:</b> Desconhecido</p> <p><b>Limite de escoamento:</b> <math>5.51485e+007 \text{ N/m}^2</math></p> <p><b>Resistência à tração:</b> <math>1.24084e+008 \text{ N/m}^2</math></p> <p><b>Módulo elástico:</b> <math>6.9e+010 \text{ N/m}^2</math></p> <p><b>Coefficiente de Poisson:</b> 0.33</p> <p><b>Massa específica:</b> <math>2700 \text{ kg/m}^3</math></p> <p><b>Módulo de cisalhamento:</b> <math>2.6e+010 \text{ N/m}^2</math></p> <p><b>Coefficiente de expansão térmica:</b> <math>2.4e-005 \text{ /Kelvin}</math></p>
	<p><b>Nome:</b> AISI 1045 Aço, trefilado</p> <p><b>Tipo de modelo:</b> Isotrópico linear elástico</p> <p><b>Critério de falha predeterminado:</b> Desconhecido</p> <p><b>Limite de escoamento:</b> <math>5.3e+008 \text{ N/m}^2</math></p> <p><b>Resistência à tração:</b> <math>6.25e+008 \text{ N/m}^2</math></p> <p><b>Módulo elástico:</b> <math>2.05e+011 \text{ N/m}^2</math></p> <p><b>Coefficiente de Poisson:</b> 0.29</p> <p><b>Massa específica:</b> <math>7850 \text{ kg/m}^3</math></p> <p><b>Módulo de cisalhamento:</b> <math>8e+010 \text{ N/m}^2</math></p> <p><b>Coefficiente de expansão térmica:</b> <math>1.2e-005 \text{ /Kelvin}</math></p>

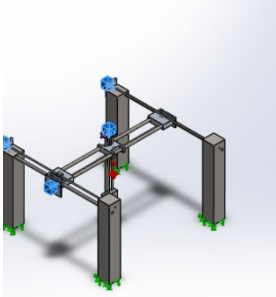
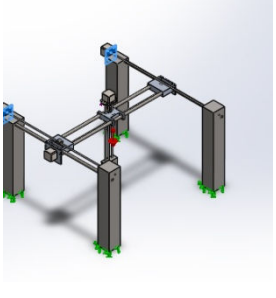
	<p><b>Nome:</b> Liga de aço</p> <p><b>Tipo de modelo:</b> Isotrópico linear elástico</p> <p><b>Critério de falha predeterminado:</b> Desconhecido</p> <p><b>Limite de escoamento:</b> 6.20422e+008 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Resistência à tração:</b> 7.23826e+008 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Módulo elástico:</b> 2.1e+011 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Coefficiente de Poisson:</b> 0.28</p> <p><b>Massa específica:</b> 7700 kg/m<sup>3</sup></p> <p><b>Módulo de cisalhamento:</b> 7.9e+010 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Coefficiente de expansão térmica:</b> 1.3e-005 /Kelvin</p>
	<p><b>Nome:</b> ABS</p> <p><b>Tipo de modelo:</b> Isotrópico linear elástico</p> <p><b>Critério de falha predeterminado:</b> Desconhecido</p> <p><b>Resistência à tração:</b> 3e+007 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Módulo elástico:</b> 2e+009 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Coefficiente de Poisson:</b> 0.394</p> <p><b>Massa específica:</b> 1020 kg/m<sup>3</sup></p> <p><b>Módulo de cisalhamento:</b> 3.189e+008 N/m<sup>2</sup></p>

Tabela A.5 - Informações da malha.

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Transição automática:	Desativada
Incluir loops de malha automáticos:	Desativada
Pontos Jacobianos	Nos nós
Tamanho do elemento	19,6044 mm
Tolerância	0,98022 mm
Qualidade da malha	Alta

Tabela A.6 - Resultados de *Von Mises*.

Nome	Tipo	Mínimo	Máximo
<b>Tensão1</b>	VON: tensão de <i>Von Mises</i>	42.2686 N/m <sup>2</sup> Nó: 48781	7.82697e+006 N/m <sup>2</sup> Nó: 37977

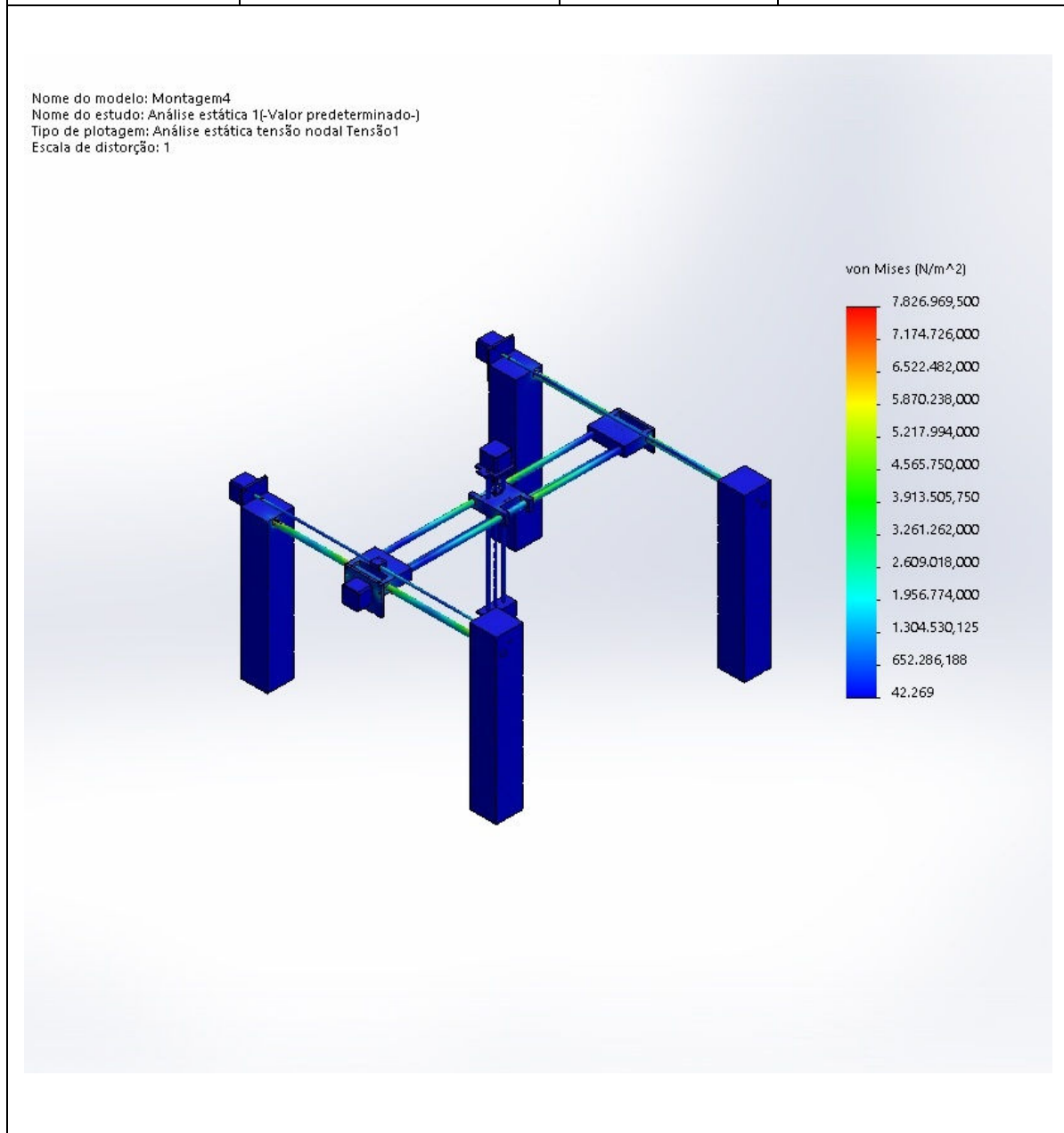
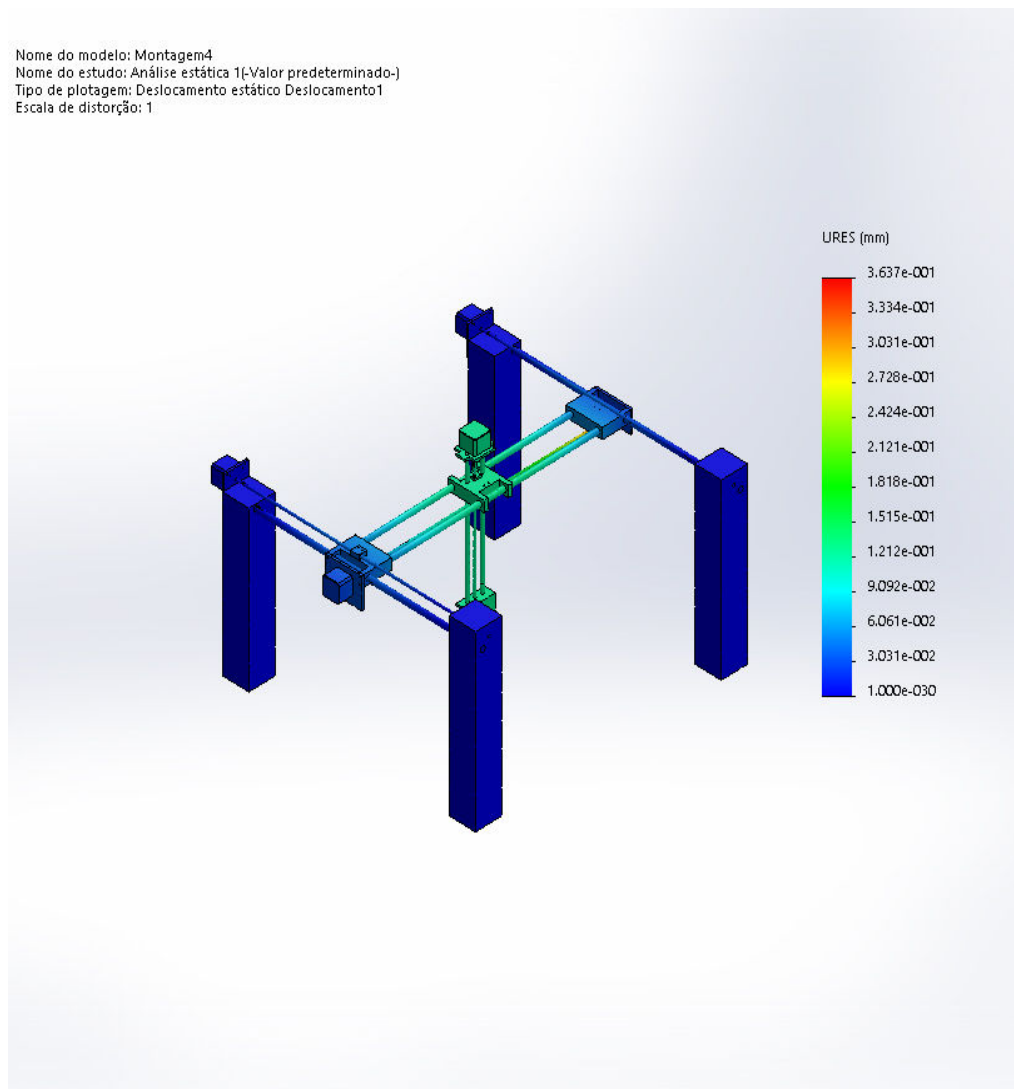




Tabela A.7- Resultados da simulação de deslocamento.

Nome	Tipo	Mínimo	Máximo
<b>Deslocamento1</b>	URES: Deslocamento resultante	0 mm Nó: 167	0.363669 mm Nó: 56310

Nome do modelo: Montagem4  
 Nome do estudo: Análise estática 1(-Valor predeterminado-)  
 Tipo de plotagem: Deslocamento estático Deslocamento1  
 Escala de distorção: 1



## APÊNDICE 3

Para cálculo dos dados requeridos na seleção dos motores de passo, foram seguidas as seguintes etapas:

Etapa 1 - Utilizou-se a Equação A.1, Equação A.2 e a Equação A.3 para Cálculo da inércia da carga ( $J_{totalcarga}$ ):

$$J_{carga} = w * p^2 * \left(\frac{1}{2} * \pi\right)^2 \quad (A.1)$$

$$J_{fuso} = \frac{\pi}{32} * d^4 * L * r \quad (A.2)$$

$$J_{carga\ total} = J_{carga} + J_{fuso} \quad (A.3)$$

Etapa 2 – Utilizou-se a Equação A.4 e a Equação A.5 para cálculo da inércia total ( $J_{total}$ ):

$$J_{total} = J_{carga\ total} + J_{motor} \quad (A.4)$$

$$\text{Se } J_{carga\ total} > 10 * J_{motor} \text{ o motor não é aplicável} \quad (A.5)$$

Etapa 3 - Cálculo do torque do sistema ( $T_L$ ):

Utilizou-se a Equação A.6 para determinações dos deslocamentos horizontais:

$$T_L = \frac{F * p}{2 * \pi} \quad (A.6)$$

Utilizou-se a Equação A.7 para determinação dos deslocamentos verticais:

$$T_L = \frac{((g * w) + F) * p}{2 * \pi} \quad (A.7)$$

Etapa 4 - Utilizou-se a Equação A.8 para cálculo do torque e obtenção da velocidade base ( $T_b$ ):

$$T_a = J_{total} * V_b^2 * 0,00032 \quad (A.8)$$

Etapa 5 - Utilizou-se a Equação A.9 para cálculo do torque e obtenção da aceleração do sistema ( $T_a$ ):

$$T_a = J_{total} * \left(\frac{V_f - V_b}{t_{acc}}\right) * 0,00064 \quad (A.9)$$

Sendo  $L$ =comprimento (m),  $d$ =diâmetro do fuso (m),  $J$ =inércia ( $N.m^2$ ),  $p$ =passo do fuso (m/volta),  $g=9,81m/s^2$ ,  $F$ = força externa (N),  $w$ = carga (kg).

O pórtico possui os seguintes dados:

$$L= 0,4m$$

$$d= 0,006m$$

$$J_{motor}=5,4 \times 10^{-6}kg.m^2$$

$$p= 0,001m$$

$$F=10N$$

$$w_x=3,842kg$$

$$w_y=1,280kg$$

$$w_z=1,034kg$$

Utilizando-se das equações listadas, têm-se:

$$T_{Lx}=0,00159N.m$$

$$T_{Ly}=0,00159N.m$$

$$T_{Lz}=0,00159N.m$$

$$T_{bx}=0,00450N.m$$

$$T_{by}=0,00317N.m$$

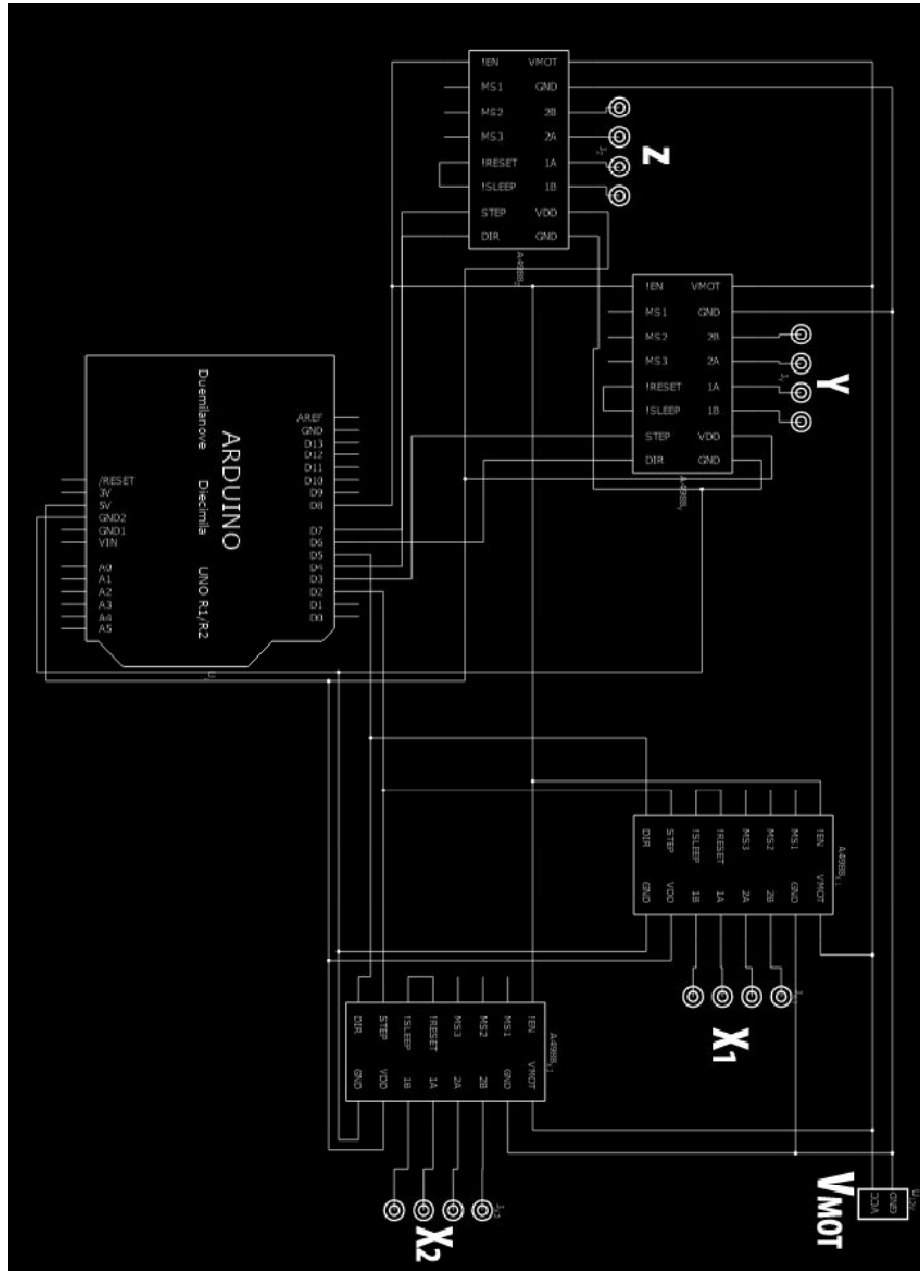
$$T_{bz}=0,00517N.m$$

$$T_{ax}=3,599 \times 10^{-6}N.m$$

$$T_{ay}=2,48 \times 10^{-6}N.m$$

$$T_{az}=4,13 \times 10^{-6}N.m$$

# APÊNDICE 4



## ANEXO 1

Tabela A.8- Códigos G segundo padrão ISO (SILVA, 2008).

G00	Posicionamento rápido
G01	Interpolação linear
G02	Interpolação circular no sentido horário
G03	Interpolação circular no sentido anti-horário
G04	Temporização
G20	Programação em sistema Inglês (polegadas)
G21	Programação em sistema Internacional (métrico)
G28	Retorna a posição do zero máquina
G40	Cancelamento da compensação do diâmetro da ferramenta
G41	Compensação do diâmetro da ferramenta (esquerda)
G42	Compensação do diâmetro da ferramenta (direita)
G45 a G52	Compensações de comprimentos das ferramentas
G53	Cancelamento das configurações de posicionamento fora do zero fixo
G68	Compensação da ferramenta por dentro do raio de canto
G69	Compensação da ferramenta por fora do raio de canto
G70	Programa em polegadas
G71	Programa em milímetros
G80	Cancelamento dos ciclos fixos
G81 a G89	Ciclos fixos
G90	Posicionamento absoluto
G91	Posicionamento incremental
G92	Zeramento de eixos (mandatório sobre os G54)
G94	Avanço dado em metros por minuto
G95	Avanço por revolução
G96	Avanço constante sobre superfícies
G97	Rotação do fuso dada em RPM

Tabela A.9 - Códigos M segundo padrão ISO (SILVA, 2008).

M00	Parada do programa
M01	Parada opcional
M02	Fim de programa
M03	Liga o fuso no sentido horário
M04	Liga o fuso no sentido anti-horário
M05	Desliga o fuso
M06	Mudança de ferramenta
M08	Liga sistema de refrigeração
M09	Desliga sistema de refrigeração
M10	Atua travamento de eixo
M11	Desliga atuação do travamento de eixo
M19	Parada do fuso com orientação
M30	Fim de programa
M36	Acionamento da primeira gama de velocidade dos eixos
M37	Acionamento da segunda gama de velocidade dos eixos
M60	Mudança de posição de trabalho
M61	Reposicionamento linear
M71	Reposicionamento angular