

Nota: 10,0(dcz)

*AmBapu*



**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Projeto Mecânico e Construção de um Robô  
Bípede para a Reprodução da Marcha Humana  
Autônoma**

**Volume 2**

Anderson Gomes Soares

Vincent Pierre Queminn Le Diagon

*Orientador:* Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

*Co-orientador:* Dr. Luciano Luporini Menegaldo

São Paulo

2002



**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

# **Projeto Mecânico e Construção de um Robô Bípede para a Reprodução da Marcha Humana Autônoma**

## **Volume 2**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Graduação em Engenharia  
Mecânica

Anderson Gomes Soares

Vincent Pierre Quemini Le Diagon

*Orientador:* Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

*Co-orientador:* Dr. Luciano Luporini Menegaldo

Área de Concentração:

Engenharia Mecânica

São Paulo

2002

Aos alunos desta Escola que terão a árdua tarefa de dar continuidade a este importante trabalho.

*“Há sempre um modo mais fácil de fazer qualquer coisa.”*

(Lei de Beltrão)

## **AGRADECIMENTOS**

Ao nosso orientador, Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury e ao nosso co-orientador, Dr. Luciano Luporini Menegaldo, por nos oferecer a oportunidade de participar deste projeto e pelo suporte.

Ao nosso coordenador, Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto, pela paciência e compreensão.

Ao nosso colega de trabalho e amigo Christian, pelo empenho e dedicação durante toda a realização do projeto, o que nos motivou ainda mais a participar ativamente deste nas horas mais difíceis.

Ao Prof. Dr. José Jaime da Cruz, do Departamento de Engenharia Elétrica - Telecomunicações e Controle, pela busca de recursos que tornaram possível a construção do robô

Aos colegas e amigos André, Marcello e Rogério, pela participação neste projeto e sem os quais o seu sucesso não seria alcançado.

A todos que, direta e indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

### **Anderson G. Soares agradece**

A todos os meus familiares, em especial aos meus pais, Carlos e Carminha, e aos meus irmãos Sandra, Marcelo, Júnior e Dayane (°), pelo carinho e pelo incentivo que sempre me ofereceram.

Aos amigos da Poli Júnior, pelo incentivo a este trabalho e, em especial ao Cássio, pelas fotos do robô.

Aos demais colegas de turma e docentes do Departamento de Engenharia Mecânica desta Escola, que muito tiveram a contribuir para a minha formação pessoal e profissional, os meus mais sinceros agradecimentos.

## **Vincent P. Q. Le Diagon agradece**

A meus pais, Christian e Marie-Françoise, a minhas avós, Mamijo e Mamita e aos meus irmãos Isabelle, Franck e Mélanie pelo afeto, incentivo e força que me ofereceram durante todos esses anos de faculdade.

À TERMICOM ® - Indústria e Comércio de Terminais e Conexões Mecânicas LTDA – e seus funcionários Fernando, Renato e Adriana, pelo tratamento e consideração que tiveram por mim e por este trabalho de formatura.

Ao Giacomo da MARCUCCI Modelismo Comércio e Serviços LTDA, pela boa vontade e ajuda quando mais precisamos.

Ao sistema SEDEX de Correios, pela sua pontualidade e competência de seus serviços.

Aos meus colegas e amigos do Departamento Técnico de Manutenção da Rhodia Poliamida, Pontinha, Toninho, Tosin, Sérgio, Valdir, Valdir Aguilar, Sílvio, Mariana e Talita pelo incentivo, compreensão e tolerância que me permitiram seguir este trabalho de formatura até o final.

Aos colegas e docentes que passaram pela minha vida acadêmica e que contribuíram para minha formação profissional e pessoal.

Aos amigos de longa data, pela compreensão e pela paciência que tiveram durante minhas longas ausências (forçadas).

Finalmente, aos meus amigos de faculdade, em especial Rui, Rodrigo “Japonês”, Adonis e principalmente Melissa, pelos momentos difíceis, pelos momentos de descontração, pelos momentos tristes e alegres tão intensamente vividos e pela ajuda que nunca recusaram a me oferecer (obrigado mesmo!).

## SUMÁRIO – VOLUME 1

### LISTA DE FIGURAS

### RESUMO

### ABSTRACT

|          |                                                                        |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                                | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>ESTUDO BIBLIOGRÁFICO</b> .....                                      | <b>2</b>  |
| <b>3</b> | <b>DESCRIÇÃO GERAL DO PROJETO</b> .....                                | <b>4</b>  |
| <b>4</b> | <b>DESCRIÇÃO DO PROJETO: JUNTA DO TORNOZELO</b> .....                  | <b>8</b>  |
| 4.1      | MECANISMOS ESTUDADOS .....                                             | 9         |
| 4.1.1    | <i>Mecanismo composto de uma biela-manivela e uma engrenagem</i> ..... | 9         |
| 4.1.2    | <i>Mecanismo composto de duas biela-manivelas</i> .....                | 11        |
| 4.1.3    | <i>Mecanismo composto por parafuso de movimento</i> .....              | 13        |
| 4.2      | ESCOLHA DO MECANISMO .....                                             | 13        |
| 4.3      | MODELAGEM DO MECANISMO .....                                           | 15        |
| 4.3.1    | <i>Definição das Equações do Sistema</i> .....                         | 17        |
| 4.3.2    | <i>Resolução do Sistema de Equações</i> .....                          | 21        |
| 4.3.3    | <i>Determinação dos ângulos reais da marcha humana</i> .....           | 28        |
| <b>5</b> | <b>PROJETO DO MECANISMO</b> .....                                      | <b>33</b> |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÃO E DISCUSSÕES</b> .....                                    | <b>38</b> |
| <b>7</b> | <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....                                              | <b>39</b> |
|          | <b>ANEXO I</b> .....                                                   | <b>40</b> |
|          | <b>ANEXO II</b> .....                                                  | <b>42</b> |

## SUMÁRIO – VOLUME 2

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

|          |                                                                                    |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                            | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVO.....</b>                                                               | <b>3</b>  |
| <b>3</b> | <b>ESTUDO SOBRE A MARCHA E OS MEMBROS INFERIORES DO CORPO HUMANO ....</b>          | <b>4</b>  |
| 3.1      | MEMBROS INFERIORES DO CORPO HUMANO .....                                           | 4         |
| 3.2      | ARTICULAÇÕES .....                                                                 | 7         |
| 3.3      | CICLO DE MARCHA .....                                                              | 11        |
| <b>4</b> | <b>ESCOLHA DO MECANISMO DA JUNTA DO QUADRIL .....</b>                              | <b>14</b> |
| 4.1      | JUNTA PRIMITIVA.....                                                               | 16        |
| 4.2      | JUNTA “JOYSTICK” CILÍNDRICA.....                                                   | 17        |
| 4.3      | JUNTA “JOYSTICK” ESFÉRICA.....                                                     | 19        |
| 4.4      | JUNTA “BIELA-MANIVELA”.....                                                        | 20        |
| 4.5      | ESCOLHA DA JUNTA.....                                                              | 20        |
| <b>5</b> | <b>DIMENSIONAMENTO DA JUNTA – MODELAGEM ESTATICA.....</b>                          | <b>23</b> |
| <b>6</b> | <b>MECANISMOS DO JOELHO E DO TORNOZELO DO ROBÔ .....</b>                           | <b>35</b> |
| <b>7</b> | <b>SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA A CONSTRUÇÃO DOS MEMBROS INFERIORES DO ROBÔ .....</b> | <b>37</b> |
| <b>8</b> | <b>DESENHOS DE CONJUNTO E DE MONTAGEM DO ROBÔ E DE SUAS JUNTAS .....</b>           | <b>43</b> |
| 8.1      | DESENHOS DE CONJUNTO.....                                                          | 43        |
| 8.1.1    | <i>Robô por inteiro .....</i>                                                      | <i>43</i> |
| 8.1.2    | <i>Tornozelo .....</i>                                                             | <i>45</i> |
| 8.1.3    | <i>Joelho.....</i>                                                                 | <i>47</i> |
| 8.1.4    | <i>Quadril.....</i>                                                                | <i>48</i> |
| 8.2      | DESENHOS DE MONTAGEM .....                                                         | 50        |
| 8.2.1    | <i>Tornozelo .....</i>                                                             | <i>50</i> |
| 8.2.2    | <i>Joelho.....</i>                                                                 | <i>51</i> |
| 8.2.3    | <i>Quadril.....</i>                                                                | <i>52</i> |
| <b>9</b> | <b>CONCLUSÕES .....</b>                                                            | <b>53</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                            | <b>54</b> |
|          | <b>APÊNDICE A</b>                                                                  |           |
|          | <b>APÊNDICE B</b>                                                                  |           |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela I - Relação dos centros de gravidade e de cada membro com relação aos seus comprimentos. ....       | 7  |
| Tabela II - Relação do número de graus de liberdade em cada junta do robô .....                            | 11 |
| Tabela III - Ângulos característicos nos movimentos flexão/extensão e abdução/adução do quadril.....       | 15 |
| Tabela IV - Matriz de decisão para o mecanismo da junta do quadril .....                                   | 22 |
| Tabela V - Ângulos das juntas de um homem normal no instante em que o calcanhar esquerdo toca o solo ..... | 28 |
| Tabela VI - Soluções do sistema de equações para $M_{\text{robô}} = 2,0 \text{ kg}$ .....                  | 32 |
| Tabela VII - Comparação de massa entre a primeira e a última concepção do robô .....                       | 39 |
| Tabela VIII- Dimensões dos terminais de barra adquiridos .....                                             | 41 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Membros inferiores de um corpo humano e suas principais medidas.....                                         | 4  |
| Figura 2 - Modelo dos membros .....                                                                                     | 5  |
| Figura 3 - comprimentos de cada membro em relação à altura total do corpo .....                                         | 6  |
| Figura 4 – Esquema do tornozelo humano .....                                                                            | 7  |
| Figura 5 - Esquema do joelho humano .....                                                                               | 8  |
| Figura 6 - Esquema do quadril humano.....                                                                               | 8  |
| Figura 7 - Definição dos planos de um corpo humano .....                                                                | 9  |
| Figura 8 - Movimentos relacionados ao joelho .....                                                                      | 9  |
| Figura 9 - Ângulos relativos em cada junta ao longo do ciclo da marcha .....                                            | 10 |
| Figura 10 - Ciclo da marcha de uma criança normal de 8 anos de idade .....                                              | 12 |
| Figura 11 – Eventos e períodos durante o ciclo da marcha .....                                                          | 13 |
| Figura 12 - Rotação dos quadris esquerdo e direito ao longo do ciclo da marcha.....                                     | 14 |
| Figura 13 - Rotações relativas no quadril direito durante o ciclo da marcha<br>(flexão/extensão e abdução/adução) ..... | 15 |
| Figura 14 - Rotações relativas no quadril esquerdo durante o ciclo da marcha<br>(flexão/extensão e abdução/adução)..... | 15 |
| Figura 15 - esboço da junta primitiva .....                                                                             | 17 |
| Figura 16 - Foto de um joystick cilíndrico.....                                                                         | 18 |
| Figura 17 - representação de um mecanismo tipo joystick cilíndrico .....                                                | 18 |
| Figura 18 - Mecanismo de um joystick esférico .....                                                                     | 19 |
| Figura 19 - Mecanismo de joystick esférico em 3 posições distintas.....                                                 | 19 |
| Figura 20 – Junta “biela-manivela” .....                                                                                | 20 |
| Figura 21 - Momentos na junta do quadril devido aos movimentos de flexão/extensão                                       | 23 |
| Figura 22 - Momentos na junta do quadril devido aos movimentos de abdução/adução                                        | 24 |
| Figura 23 - Momentos nas juntas do quadril em função do tempo .....                                                     | 24 |
| Figura 24 - Ângulos relativos (a) e absolutos (b) em cada junta do robô.....                                            | 25 |
| Figura 25 - Momento em função do ângulo da junta do quadril direito.....                                                | 25 |
| Figura 26 - Momento em função do ângulo da junta do quadril esquerdo .....                                              | 26 |
| Figura 27 - Momento em função do ângulo da junta do joelho direito .....                                                | 26 |
| Figura 28 - Momento em função do ângulo da junta do joelho esquerdo .....                                               | 26 |

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 29 - Momento em função do ângulo da junta do tornozelo direito .....                                     | 27 |
| Figura 30 - Momento em função do ângulo da junta do tornozelo esquerdo .....                                    | 27 |
| Figura 31 - Esquema do robô na posição de máximo momento na junta do quadril .....                              | 28 |
| Figura 32 - Diagramas de corpo livre dos membros inferiores do robô .....                                       | 29 |
| Figura 33 - Relações entre os momentos em cada junta e o peso de uma pessoa durante o ciclo de marcha .....     | 33 |
| Figura 34 - Relação entre o momento no quadril e a massa do robô .....                                          | 34 |
| Figura 35 - Mecanismo do joelho do robô .....                                                                   | 35 |
| Figura 36 - Modelo geométrico do mecanismo do tornozelo .....                                                   | 36 |
| Figura 37 - Mecanismo do tornozelo do robô .....                                                                | 36 |
| Figura 38 - Concepções inicial (à esquerda) e final (à direita) do robô .....                                   | 39 |
| Figura 39 - Rótulas e terminais rotulares a serem utilizados nas juntas do quadril e do tornozelo do robô ..... | 40 |
| Figura 40 - Terminais de barra adquiridos para a construção do robô .....                                       | 41 |
| Figura 41 - Mecanismo do tornozelo: concepção inicial (à esquerda) e concepção final (à direita) .....          | 42 |
| Figura 42 - Mecanismo do quadril: concepção inicial (à esquerda) e concepção final (à direita) .....            | 42 |
| Figura 43 - Desenho de conjunto do robô .....                                                                   | 44 |
| Figura 44 - Desenho de conjunto do tornozelo – vista isométrica .....                                           | 45 |
| Figura 45 – Desenho de conjunto do tornozelo – vista lateral .....                                              | 45 |
| Figura 46 – Desenho de conjunto do tornozelo – vista frontal .....                                              | 46 |
| Figura 47 – Desenho de conjunto do tornozelo – vista traseira .....                                             | 46 |
| Figura 48 – Desenho de conjunto do joelho – vista isométrica .....                                              | 47 |
| Figura 49 - Desenho de conjunto do joelho - vista frontal .....                                                 | 47 |
| Figura 50 - Desenho de conjunto do quadril - vista isométrica .....                                             | 48 |
| Figura 51 - Desenho de conjunto do quadril - vista lateral .....                                                | 48 |
| Figura 52 - Desenho de conjunto do quadril - vista frontal .....                                                | 49 |
| Figura 53 - Desenho de conjunto do quadril - vista traseira .....                                               | 49 |
| Figura 54- Desenho de montagem do conjunto "coxa-tornozelo-pé" .....                                            | 50 |
| Figura 55 – Desenho de montagem do conjunto "coxa-joelho-perna" .....                                           | 51 |
| Figura 56 – Desenho de montagem do conjunto "pélvis-quadril-coxa" .....                                         | 52 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

- Letras comuns:

|      |                                                                                            |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| $At$ | Forças de atrito nos pés do robô (N);                                                      |
| $F$  | Forças nas articulações (N);                                                               |
| $g$  | Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );                                                       |
| $G$  | Distâncias dos centros de gravidade dos membros em relação às articulações superiores (m); |
| $H$  | Altura de um homem (m);                                                                    |
| $L$  | Comprimentos dos membros (m);                                                              |
| $m$  | Massas dos membros do robô, excluindo as massas dos servos (kg);                           |
| $M$  | Massas (kg);                                                                               |
| $N$  | Reações normais nos pés do robô (N);                                                       |
| $P$  | Pesos (N).                                                                                 |

- Índices subscritos:

|     |              |
|-----|--------------|
| $c$ | Perna;       |
| $f$ | Pé;          |
| $l$ | Esquerdo(a); |
| $p$ | Pélvis;      |
| $r$ | Direito;     |
| $s$ | Servo;       |
| $t$ | Coxa.        |

- Letras gregas:

|          |                                                                 |
|----------|-----------------------------------------------------------------|
| $\alpha$ | Ângulo da coxa com a vertical (ângulo da junta do quadril);     |
| $\beta$  | Ângulo da perna com a coxa (ângulo da junta do joelho);         |
| $\phi$   | Ângulo da perna com a horizontal;                               |
| $\gamma$ | Ângulo do calcanhar com a perna (ângulo da junta do tornozelo); |
| $\mu$    | Coefficiente de atrito entre o pé do robô e o solo;             |
| $\theta$ | Ângulo da coxa com a horizontal;                                |
| $\psi$   | Ângulo do calcanhar com a horizontal.                           |

## **RESUMO**

O trabalho ora apresentado consiste no projeto e na construção dos membros inferiores de um robô bípede capaz de executar a marcha humana (tanto para pessoas normais como para portadoras de disfunções motoras) a um custo acessível, condizente aos recursos disponíveis à sua realização. A primeira parte do projeto inicia com um breve estudo da marcha humana e dos membros inferiores do corpo humano, de forma a proporcionar seu entendimento e sua simplificação. Assim são apresentadas a concepção e escolha dos diferentes mecanismos utilizados para as juntas do corpo. Em seguida, o modelo cinemático para o mecanismo escolhido é desenvolvido. Na segunda parte deste projeto, é feita a seleção de materiais e componentes para a estrutura corporal e para as juntas do robô. Por fim, são feitos os desenhos de conjunto e de montagem para se iniciar a construção do robô.

## **ABSTRACT**

This project consists on the design and construction of a biped robot's lower limbs able to execute the human gait (either normal person's gait or anomalous owner's gait) with a low cost, accessible to the available budget for its creation. The first part of the project starts with a brief human gait and lower limbs of the human body research in order to get its understanding and simplifying. Then, the conception and choice of the different mechanisms used for the body links are showed. After that, the kinematics model for the chosen link is developed. In the second part of this project, it is made the material and components selection for the body structure and its joints. Finally, the building and assembly drawings are done in order to start de robot construction.

# 1 INTRODUÇÃO

Na sociedade atual, há uma crescente necessidade de se realizar tarefas com eficiência e precisão. Existem também tarefas a serem realizadas em lugares onde a presença humana se torna difícil, arriscada e até mesmo impossível, como o fundo do mar ou a imensidão do espaço. Para realizar essas tarefas, se faz cada vez mais necessária a presença de dispositivos (robôs), que realizam essas tarefas sem risco de vida. A robótica é a área que se preocupa com o desenvolvimento de tais dispositivos.

Existem atualmente robôs atuando em várias áreas da sociedade, seja como prestadores de serviços simples, seja como ferramentas de pesquisa científica e educacional ou ainda como operários, instalados nas fábricas e que proporcionam maior produtividade e qualidade final do produto.

Uma área na qual a utilização de robôs vem crescendo consideravelmente é a área médica. É muito comum se falar hoje em dia na Bioengenharia, que desenvolve diversos dispositivos para atuação na área médica como, por exemplo, as próteses.

É neste contexto que se insere o presente Projeto de Formatura, que consiste no projeto e na construção de um robô bípede cujas características dimensionais se assemelham às do corpo humano, capaz de caminhar com um padrão de marcha tão próxima quanto possível da observada em pessoas normais e em portadores de disfunções motoras. O projeto engloba o estudo, o projeto e a construção de mecanismos responsáveis pela cinemática articular do quadril, do joelho e do tornozelo do robô, a serem acionados por meio de servomotores.

Uma vez construído, o protótipo pode ser aplicado no estudo clínico da marcha humana e na reprodução de padrões de marcha patológica, podendo ser utilizado também em testes de próteses.

A principal motivação pela escolha deste tema para o Projeto de Formatura deve-se à aplicação das diversas disciplinas estudadas ao longo do curso de Engenharia Mecânica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, como o projeto de mecanismos, a fabricação dos mesmos, a modelagem cinemática e dinâmica e o projeto

de um sistema de controle para o protótipo (a modelagem dinâmica e o projeto do sistema de controle estão sendo desenvolvidos simultaneamente por alunos do curso de Engenharia Elétrica, em um Projeto de Formatura). Trata-se, portanto, de um projeto que engloba várias áreas de atuação para um engenheiro mecânico. Além disso, outro fato que representou uma motivação para a realização deste projeto foi a possibilidade de se construir um robô bípede a um custo muito menor do que os construídos por algumas empresas multinacionais, que chegam a gastar milhões de dólares na sua construção, ao passo que, neste robô, não serão gastos mais do que R\$10.000,00 entre materiais e componentes.

## **2 OBJETIVO**

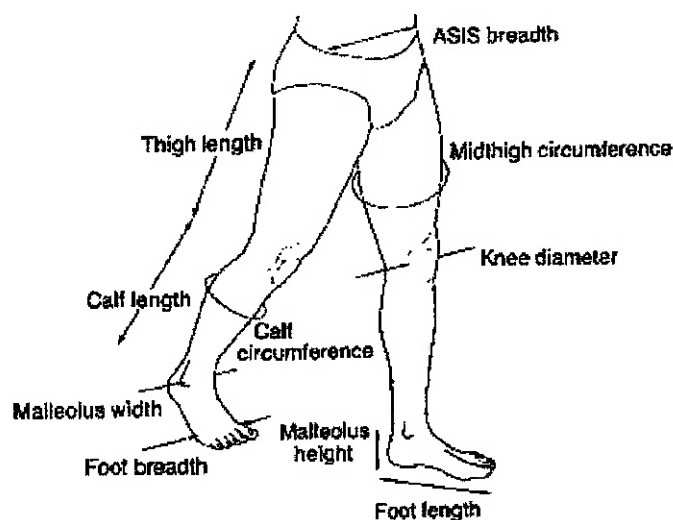
O Projeto de Formatura tem como objetivo o projeto e a construção de um robô bípede cujas características dimensionais se assemelham às do corpo humano, capaz de caminhar com um padrão de marcha tão próxima quanto possível da normalmente observada em pessoas normais e em portadores de disfunções motoras a um custo reduzido (menor que R\$10.000,00).

### 3 ESTUDO SOBRE A MARCHA E OS MEMBROS INFERIORES DO CORPO HUMANO

O primeiro passo a ser seguido para o desenvolvimento do projeto é o estudo do comportamento do ciclo da marcha. No caso deste projeto, apenas os membros inferiores serão analisados, tendo em vista que o robô será composto por uma bacia, coxas, pernas e pés com características semelhantes às do corpo humano.

#### 3.1 Membros inferiores do corpo humano

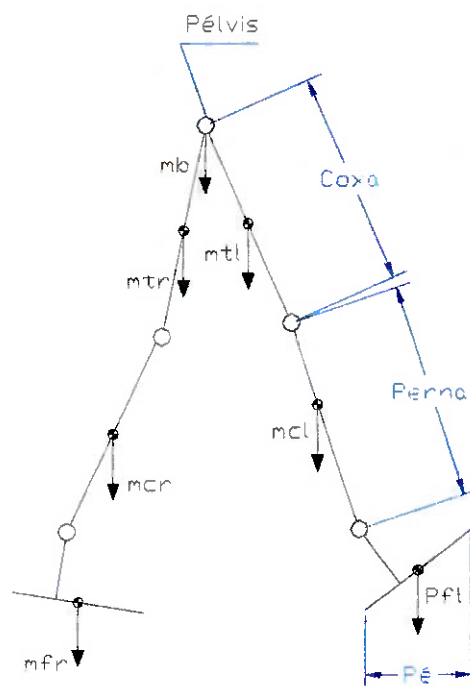
Os membros chamados “inferiores” são responsáveis pela sustentação do corpo e pela marcha. São eles: pés (foot/feet), pernas (shin), coxas (thigh) e pélvis (pelvis – também chamada de bacia), que serão chamados por “f”, “s” e “p” respectivamente (Figura 1).



**Figura 1 - Membros inferiores de um corpo humano e suas principais medidas**

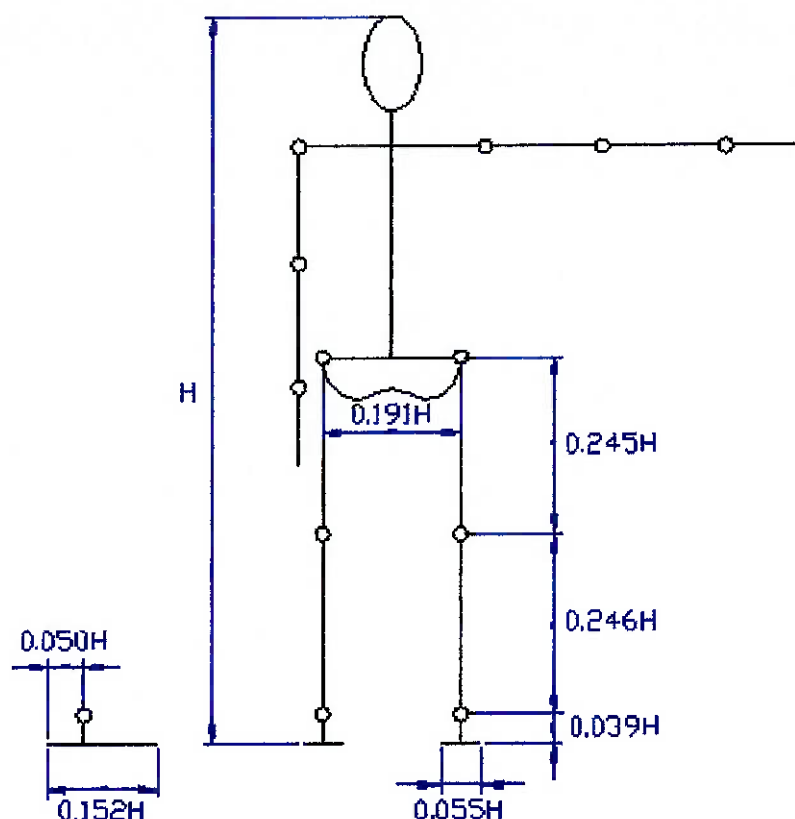
Ressalta-se que não serão discutidas as particularidades desses membros, nem o detalhamento dos mesmos, pois este trabalho não visa estes assuntos. Para efeito de modelagem cada um dos membros será representado por uma barra simples com massa

concentrada em seu centro (Figura 2), com exceção ao pé que é representado por duas barras perpendiculares, uma representando a planta do pé e outra o calcanhar com centro de gravidade localizado na barra que representa a planta do pé. Os parâmetros importantes para o desenvolvimento do trabalho são os comprimentos e as massas de cada um dos membros. Esses fatores serão fundamentais para a modelagem da junta, como será visto posteriormente.



**Figura 2 - Modelo dos membros**

Um estudo sobre o corpo humano apresenta a correlação entre o comprimento médio de todos os membros do corpo de uma pessoa e a sua altura total como mostra a Figura 3. Daí são obtidos os comprimentos de cada membro do robô estimando-se a sua altura total se possuísse um corpo completo (com todos os membros). Os comprimentos são abreviados pela letra “L” (por exemplo,  $L_{tr}$  corresponde ao comprimento da coxa direita).



**Figura 3 - comprimentos de cada membro em relação à altura total do corpo**

Porém, a posição do centro de massa de um membro real não fica em seu centro. Isto se deve à distribuição não uniforme dos músculos ao longo do membro. O software GaitLAB<sup>1</sup> fornece em seus bancos de dados a correlação entre a distância do centro da gravidade com a junta superior e o comprimento total do membro. Estas correlações estão indicadas pela Tabela I:

<sup>1</sup> O GaitLAB é um software de análise do comportamento dos membros humanos durante a marcha e foi extensamente utilizado para a realização do projeto. Uma das suas aplicações são as simulações da marcha de um homem, de uma mulher e de um homem clinicamente defeituoso e ainda indica as solicitações (momentos e forças) em todos os membros inferiores a cada instante da marcha, assim como as posições relativas entre eles.

Tabela I - Relação dos centros de gravidade e de cada membro com relação aos seus comprimentos.

| Segment Name                             | R. Thigh | L. Thigh | R. Calf | L. Calf | R. Foot | L. Foot |
|------------------------------------------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|
| Mass (kg)                                | 6,86     | 6,82     | 3,28    | 3,28    | 0,77    | 0,76    |
| CG Position (ratio)<br>(proximal/length) | 0,39     | 0,39     | 0,42    | 0,42    | 0,44    | 0,44    |

A distância entre o centro de gravidade do membro e a junta superior é indicada pela letra “G” (por exemplo,  $G_{sl}$  é a distância entre o centro de gravidade da perna esquerda e o joelho).

Como já foi mencionado, os servos serão responsáveis pelo movimento relativo entre um membro e outro, ou seja, ele desempenha o papel correspondente ao músculo, enquanto que a barra possui a função do osso que é a sustentação.

### 3.2 Articulações

As articulações são responsáveis pela transmissão de movimento angular relativo entre cada membro e são elas: o tornozelo (ankle) entre o pé e a perna, o joelho (knee) entre a perna e a coxa, e o quadril (hip) entre a coxa e a pélvis e são respectivamente denominadas pelas letras “a”, “k” e “h” (Figura 4, Figura 5 e Figura 6).

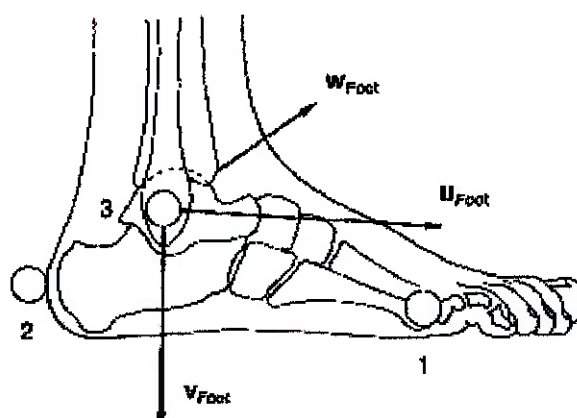
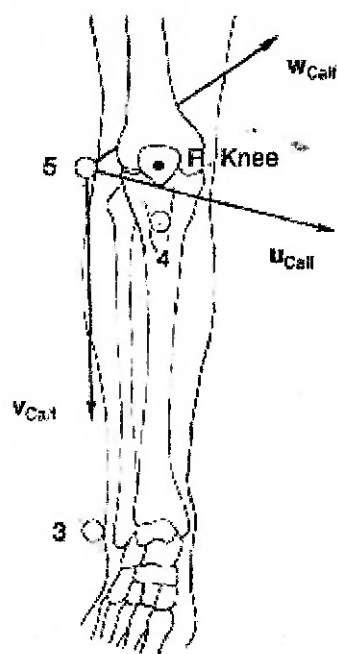
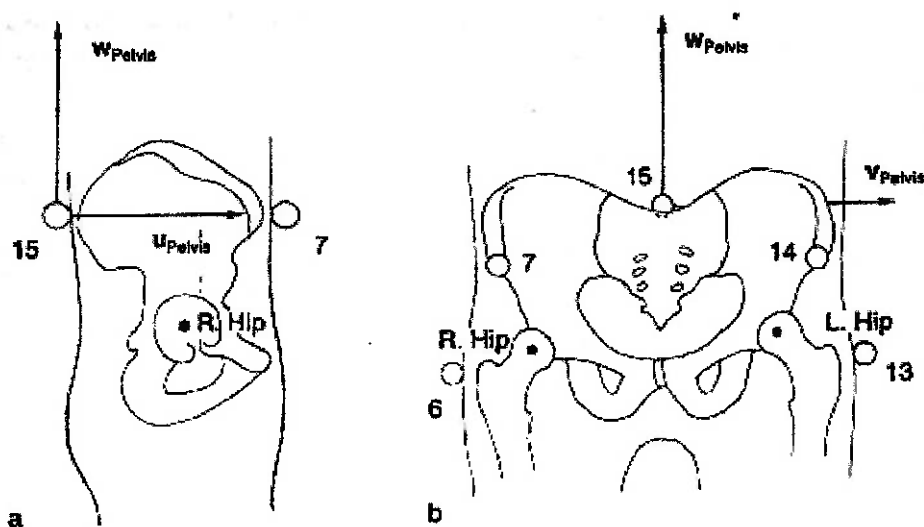


Figura 4 – Esquema do tornozelo humano



**Figura 5 - Esquema do joelho humano**

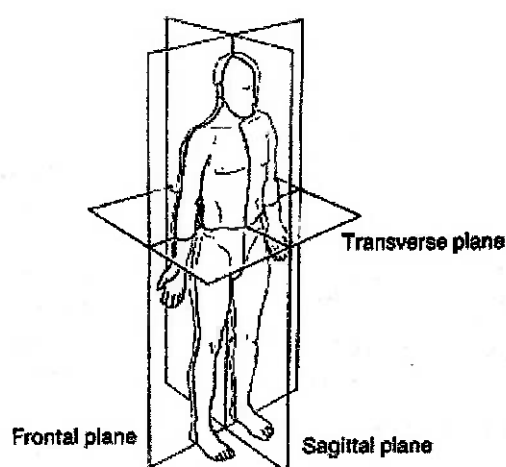


**Figura 6 - Esquema do quadril humano**

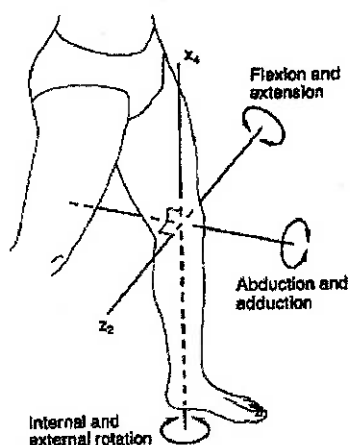
Todas as articulações permitem a realização de três movimentos, dois de deslocamento angular e um de torção. Os dois primeiros são flexão/extensão e adução/abdução e o terceiro, rotação interna/externa. A flexão/extensão é o movimento do membro realizado no plano sagital (lateral ao corpo - Figura 7), ou seja, para trás

(flexão) e para frente (extensão). A adução/abdução é o movimento realizado no plano frontal, ou seja, para dentro (adução) e para fora (abdução) do corpo. A rotação é o movimento realizado na direção do eixo do membro provocando assim uma torção para dentro (interna) ou para fora (externa) do corpo. A Figura 8 ilustra estes três movimentos realizados através do joelho.

Para o tornozelo, apesar de transmitir também estes três movimentos, as denominações destes são diferenciadas: flexão dorsal/plantar, varus/valgus e inversão/eversão respectivamente.



**Figura 7 - Definição dos planos de um corpo humano**



**Figura 8 - Movimentos relacionados ao joelho**

Percebe-se então que cada articulação possui três graus de liberdade. Porém, alguns movimentos são muito pequenos em relação aos outros e assim, para efeito de modelagem, pode-se reduzir os graus de liberdade de cada articulação. Pela Figura 9 determinam-se os movimentos mais importantes em cada articulação. Como se pode notar, o movimento de rotação do quadril é desprezível com relação ao mesmo movimento do pé.

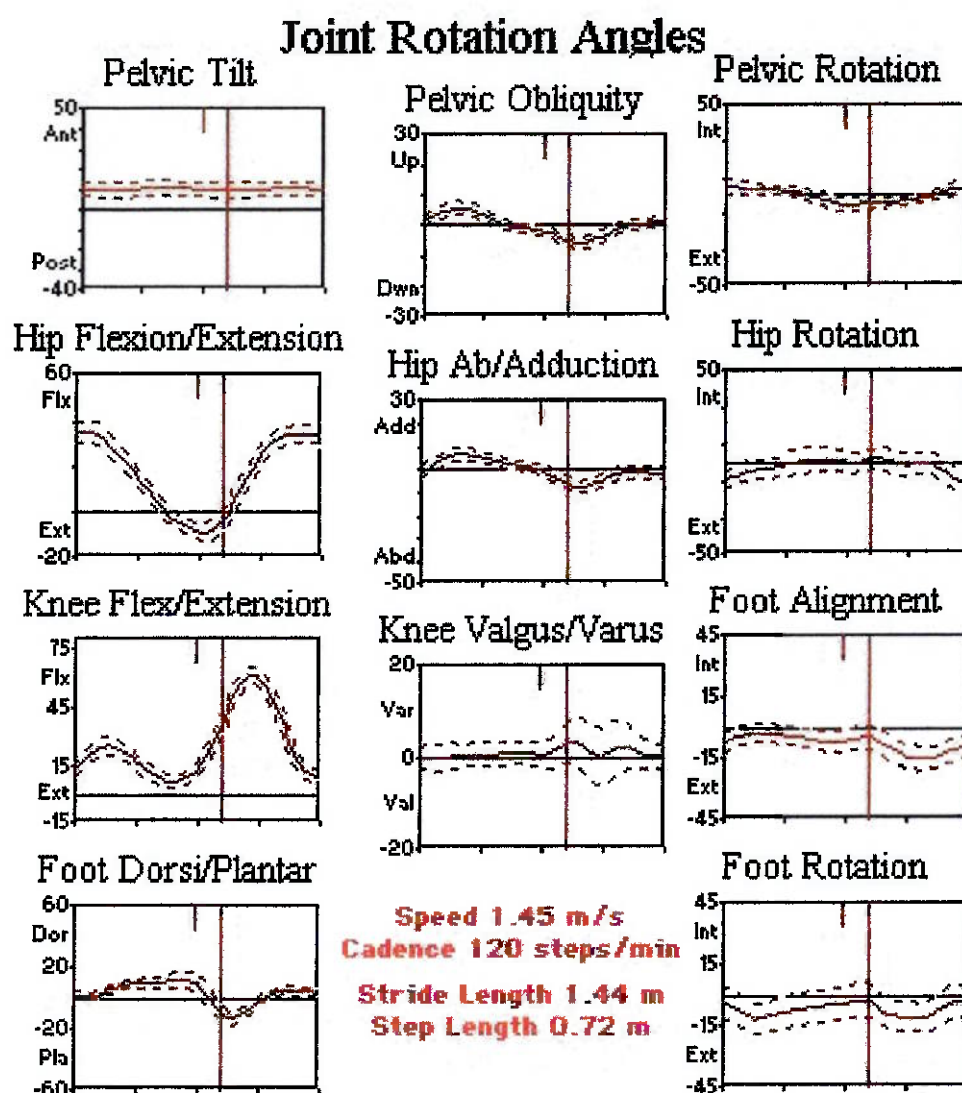


Figura 9 - Ângulos relativos em cada junta ao longo do ciclo da marcha

No robô bípede em desenvolvimento, os membros serão separados por mecanismos de juntas que representarão as articulações de uma forma simplificada (com um ou dois graus de liberdade, dependendo da importância destes em relação aos outros), mas guardando as suas principais características cinemáticas e dinâmicas. Assim, limitaram-se as juntas da seguinte maneira:

**Tabela II - Relação do número de graus de liberdade em cada junta do robô**

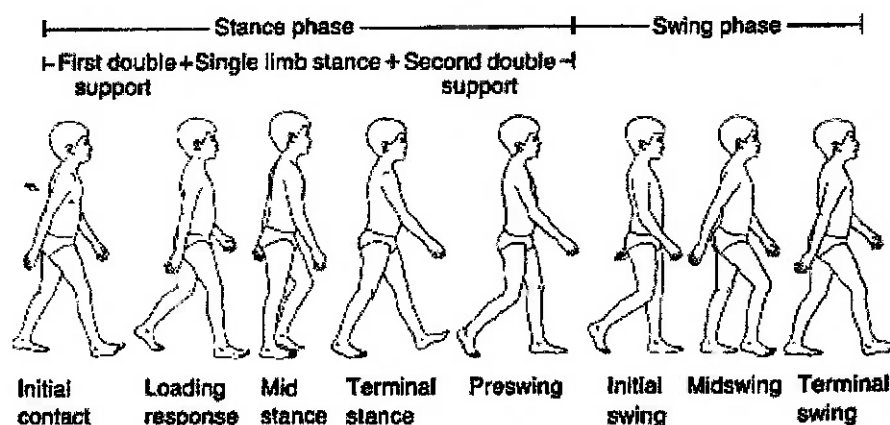
| Juntas    | Quantidade | Movimentos                               | Graus de liberdade |
|-----------|------------|------------------------------------------|--------------------|
| Quadril   | 2          | adução/abdução, flexão/extensão da coxa  | 2                  |
| Joelho    | 2          | flexão/extensão da perna                 | 1                  |
| tornozelo | 2          | inversão/eversão e flexão/extensão do pé | 2                  |

Em cima destas determinações serão elaborados os mecanismos de cada junta, levando-se em consideração fatores que serão especificados adiante. O projeto da junta do tornozelo do robô foi realizado por um outro grupo que também está neste projeto, portanto maiores detalhes deste mecanismo podem ser encontrados no volume 1 deste trabalho.

### **3.3 Ciclo de marcha**

A marcha humana, que se caracteriza pela sucessão de passos, apresenta um ciclo bem determinado que se decompõe em duas fases: “stance phase” (fase de postura), quando um dos pés está em contato com o solo e “swing phase” (fase de balanço) quando este pé não está mais em contato com o solo e a perna correspondente está balançando para frente. Pela Figura 10, a fase de postura pode ser subdividida em outras fases:

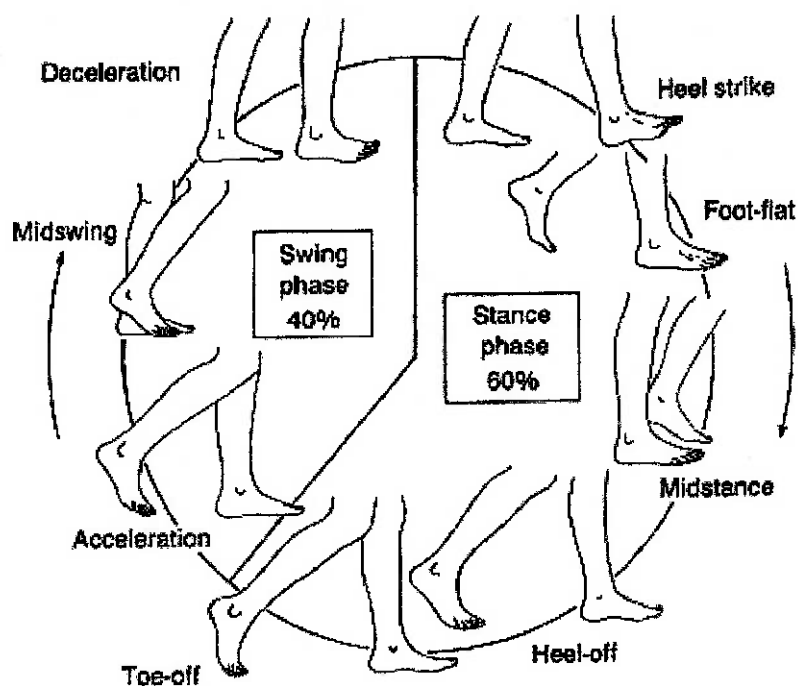
- “First double support” (primeiro bi-apoio): quando os dois pés estão apoiados no chão;
- “Single limb stance” (apoio simples): apenas um pé está em contato com o solo enquanto que a outra perna está em balanço.
- “Second double support” (segundo bi-apoio): os dois pés estão apoiados novamente no chão;



**Figura 10 - Ciclo da marcha de uma criança normal de 8 anos de idade**

Tradicionalmente, o ciclo da marcha foi dividido em 8 eventos ou períodos, cinco durante a fase de postura e três durante a fase de balanço (Figura 11):

1. “Heel strike”: instante em que há o impacto do calcanhar no solo e se inicia a fase de postura (o centro de gravidade do corpo está em seu ponto mais baixo);
2. “Foot-flat”: instante em que toda a superfície do pé está em contato com o chão;
3. “Midstance”: instante em que a perna em balanço passa pela perna apoiada (o centro de gravidade do corpo está em seu ponto mais alto);
4. “Heel-off”: instante em que o calcanhar perde contato com o solo;
5. “Toe-off”: instante em que os dedos do pé perdem contato com o solo e, assim, termina-se a fase de postura;
6. “Acceleration”: instante logo após de “toe-off” em que a perna é acelerada para frente;
7. “Midswing”: instante em que a perna em balanço passa pela perna apoiada;
8. “Desacceleration”: desaceleração do pé preparando o próximo “heel strike”.

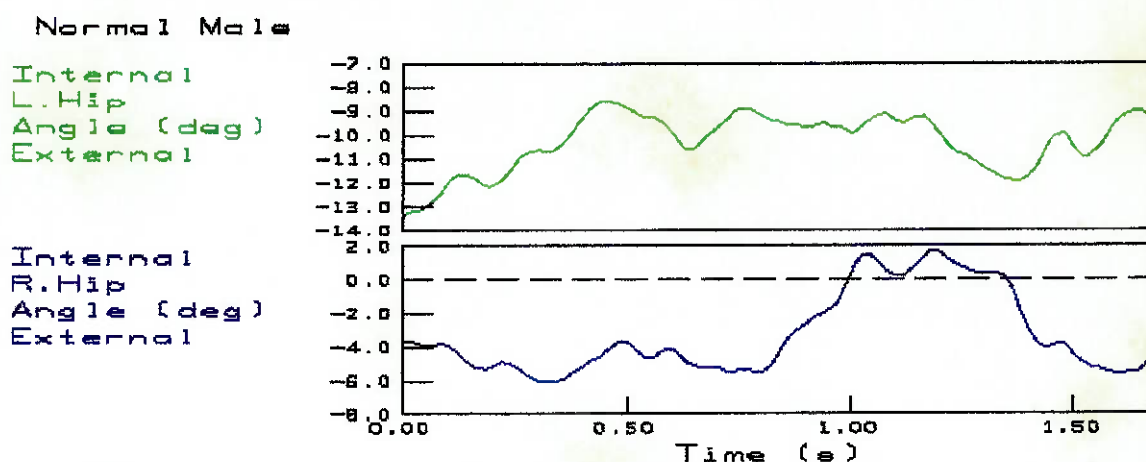


**Figura 11 – Eventos e períodos durante o ciclo da marcha**

Uma vez o ciclo da marcha determinado, será possível, posteriormente, obter um melhor entendimento do comportamento do corpo em cada fase e, assim, adequar o robô para cada instante, pois os esforços internos dependem da posição de cada membro e principalmente das características das fases de bi-apoio e de apoio simples, como será visto adiante.

## 4 ESCOLHA DO MECANISMO DA JUNTA DO QUADRIL

Uma vez determinado o número de graus de liberdade e os movimentos que cada junta deverá exercer, deve-se encontrar um mecanismo o mais apropriado possível para a construção do robô mantendo as características morfológicas do corpo humano. No caso do quadril, a junta deve possuir dois graus de liberdade, sendo que os dois transmitem movimento angular relativo entre a coxa e a pélvis (flexão/extensão e abdução/adução). O quadril real possui um terceiro grau de liberdade que corresponde à rotação da coxa, mas optou-se por não representá-lo no robô, não somente para simplificar o sistema, mas também porque esta rotação, por ser pequena (em torno de 6° de rotação máxima conforme Figura 12 obtida através o GaitLAB) influi pouco nos movimentos da marcha retilínea.

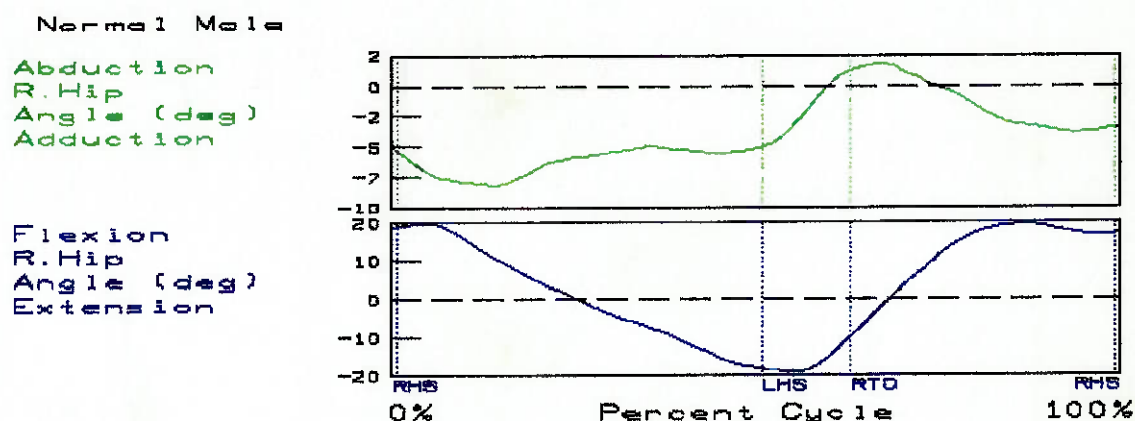


**Figura 12 - Rotação dos quadris esquerdo e direito ao longo do ciclo da marcha**

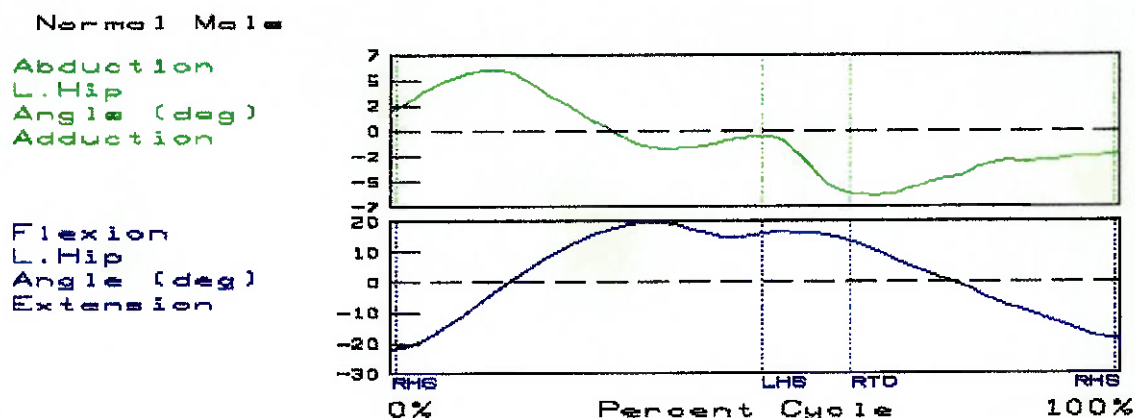
O primeiro parâmetro a ser considerado é a faixa de rotação do mecanismo durante os movimentos de flexão/extensão e de abdução/adução. Este parâmetro é determinado através dos gráficos ângulo×tempo no quadril obtidos pelo GaitLAB. Analisando-se a Figura 14 percebe-se que as faixas de rotação são de aproximadamente 12° para abdução/adução e de 42° para flexão/extensão como indica a Tabela III:

**Tabela III - Ângulos característicos nos movimentos flexão/extensão e abdução/adução do quadril**

|                  | movimentos | ângulo min. | ângulo max | faixa de rotação |
|------------------|------------|-------------|------------|------------------|
| quadril direito  | Flex/ext   | -20°        | 20°        | 40°              |
|                  | Abd/ad     | -8°         | 2°         | 10°              |
| quadril Esquerdo | Flex/ext   | -22°        | 20°        | 42°              |
|                  | Abd/ad     | -6°         | 6°         | 12°              |



**Figura 13 - Rotações relativas no quadril direito durante o ciclo da marcha (flexão/extensão e abdução/adução)**



**Figura 14 - Rotações relativas no quadril esquerdo durante o ciclo da marcha (flexão/extensão e abdução/adução)**

Estes ângulos mínimos e máximos correspondem a ângulos da coxa com relação à vertical.

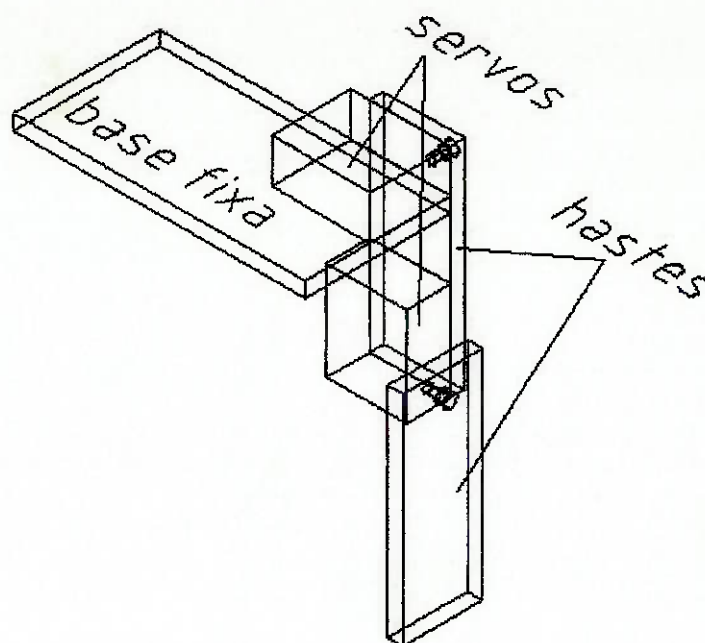
Portanto a faixa de rotação total mínima da junta deve ser de  $40^\circ$  para que não ocorra nenhum problema durante o ciclo da marcha do robô.

Definiram-se também os atuadores que movimentarão os mecanismos. Estes forem determinados pela frente de trabalho da Engenharia Elétrica, que é responsável pela parte de controle do robô. Os atuadores escolhidos foram os servomotores de aeromodelos (Hobbico CS-80), por serem relativamente mais baratos que, por exemplo, motores de passo, compactos e fáceis de controlar, além de possuírem uma rotação de trabalho de  $180^\circ$ , o que é mais do que suficiente para a junta do quadril.

Assim, sendo a transmissão do servo por torque, os mecanismos encontrados para a junta do quadril aparecem descritos a seguir.

#### **4.1 Junta primitiva**

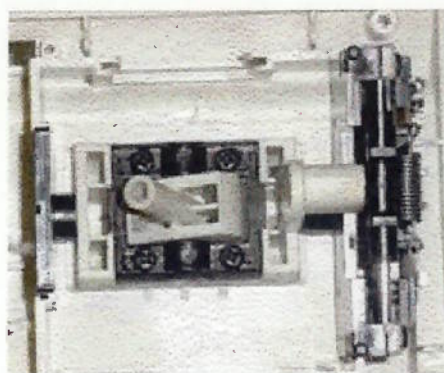
A junta “primitiva” foi a primeira idéia que surgiu, portanto é o mecanismo mais rústico dos quatro. Ela consiste em duas hastes perpendiculares, cada uma delas acopladas na saída de um servo, sendo que um servo é fixo na base do robô e o outro é fixo na primeira haste. A segunda haste representaria a coxa do robô (Figura 15). Assim, o primeiro servo, fixo na base, transmite através da haste o movimento de flexão/extensão, enquanto que o segundo servo transmite o movimento de abdução/adução da coxa, ou vice-versa (dependendo da orientação do primeiro servo em relação ao plano sagital do robô).



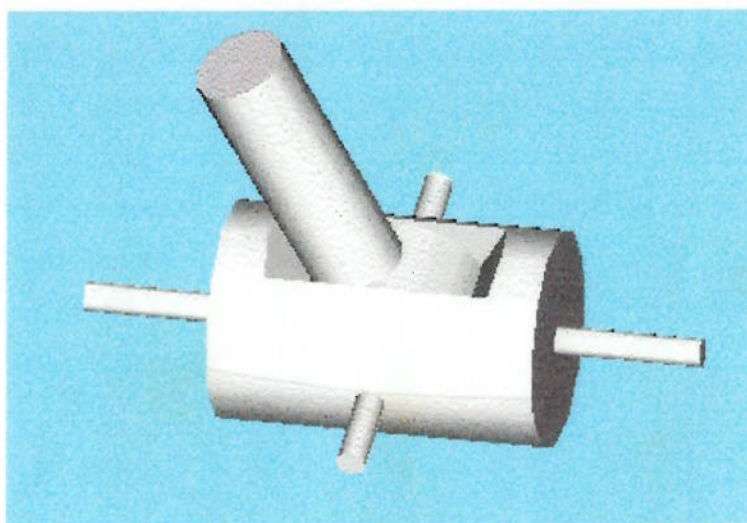
**Figura 15 - esboço da junta primitiva**

## **4.2 Junta “Joystick” cilíndrica**

A junta “Joystick” cilíndrica foi inspirada no mecanismo de um manche de um joystick para vídeo games (Figura 16). Este manche possui os dois graus de liberdade necessários para o movimento da coxa. O seu mecanismo é basicamente composto por dois cilindros, um “encaixado” no interior do outro perpendicularmente ao eixo de simetria (Figura 17), sendo cada servo acoplado diretamente em um eixo central de um cilindro distinto. Para que ambos os movimentos de flexão/extensão e abdução/adução sejam realizados, a coxa estaria conectada ao cilindro interno perpendicularmente aos eixos de simetria de cada cilindro.



**Figura 16 - Foto de um joystick cilíndrico**



**Figura 17 - representação de um mecanismo tipo joystick cilíndrico**

### 4.3 Junta "Joystick" esférica

Esta junta também foi inspirada em um joystick, porém possui um mecanismo bastante diferente do anterior (Figura 18). O mecanismo consiste em duas hastes semicirculares, com eixos de rotação perpendiculares. Estas hastes possuem um rasgo por onde passa a parte superior da coxa. No centro do mecanismo, uma articulação acoplada à coxa permite que ela tenha rotação com dois graus de liberdade. Os servos são acoplados ao eixo de rotação de cada haste, transmitindo assim o torque através do rasgo. A Figura 19 representa esquematicamente esta junta em três posições distintas.



Figura 18 - Mecanismo de um joystick esférico

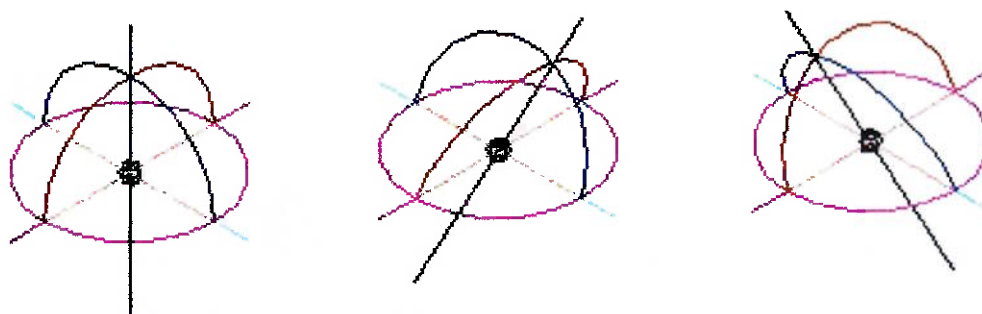


Figura 19 - Mecanismo de joystick esférico em 3 posições distintas

#### 4.4 Junta “biela-manivela”

Este mecanismo foi imaginado primeiramente para ser empregado na construção do tornozelo do robô, permitindo a este os movimentos de flexão dorsal/plantar, varus/valgus e inversão/eversão. É capaz de utilizar dois servo-atuadores para os movimentos de flexão e extensão da coxa, além dos movimentos de adução e abdução da mesma. Duplicando o momento fornecido, é possível realizar os movimentos de flexão, extensão, adução e abdução, mesmo considerando os atritos nas juntas. A Figura 20 apresenta o novo mecanismo a ser utilizado na junta do quadril do robô.

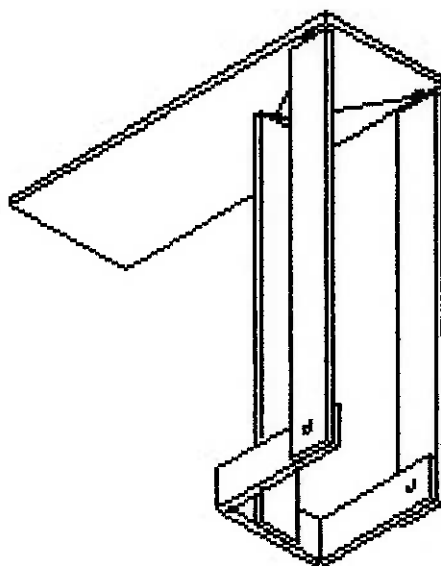


Figura 20 – Junta “biela-manivela”

#### 4.5 Escolha da junta

Embora todas as juntas projetadas acima satisfaçam as necessidades básicas (possuir dois graus de liberdade correspondentes a dois movimentos de deslocamento angular), as suas características de construção e montagem são bem distintas. Portanto,

os critérios adotados para a escolha da junta se resumem aos seguintes itens na ordem de maior para menor importância:

1. Torque fornecido (fundamental);
2. Adequação ao conjunto do robô;
3. Adequação à morfologia do corpo humano;
4. Limitações de movimento e rotação;
5. Tamanho compacto;
6. Facilidade de construção e montagem;
7. Custo.

A junta primitiva, por sua simplicidade, atende perfeitamente ao quinto critério, e ainda possui uma grande faixa de rotações ( $360^\circ$  para extensão/flexão e aproximadamente  $180^\circ$  para abdução/adução); por outro lado, não é uma junta muito apropriada, pois o servo responsável pela abdução/adução, ou seja, aquele que está preso à primeira haste, estará permanentemente em movimento relativo com o servo fixo na base. Isto não só prejudica os esforços que devem ser vencidos pelo servo fixo, mas também inviabiliza uma possível montagem de uma redução no servo em balanço e ainda deixa o mecanismo com dimensões elevadas. Além disso, a junta primitiva não proporciona morfologia semelhante à encontrada no corpo humano.

A junta “tipo joystick” cilíndrico tem como vantagem ser compacta em relação à primeira, porém apresenta o mesmo problema do movimento relativo entre os servos. E ainda, a montagem parece ser relativamente complicada e os movimentos são limitados a  $90^\circ$  tanto para a extensão/flexão quanto para a abdução/adução.

A junta “tipo joystick” esférico, apresenta resultados satisfatórios para os últimos cinco critérios: apesar de a construção não ser tão evidente, a montagem é bastante simples. Ambos os servos são fixos na base do robô e, assim, não existe movimento relativo entre eles, o que permite conectar um sistema de redução em cada um deles caso seja necessário. A junta, embora seja compacta, ainda apresenta uma faixa de rotação mais do que suficiente para a junta (como já visto anteriormente):  $180^\circ$  para ambos os

movimentos.

A junta “biela-manivela”, apesar de possuir um custo elevado para a sua construção (envolve a aquisição de juntas rotulares esféricas), é o único mecanismo que pode utilizar a potência dos dois servos para transmitir cada movimento, o que, segundo a modelagem apresentada adiante, é uma característica extremamente importante, visto que os servos têm um torque de saída limitado ( $20 \text{ kgf} \times \text{cm}$ ).

O custo das demais juntas é estimado baixo, por serem mecanismos de pequeno porte, sendo que o custo da primeira junta deve ser o mais baixo de todos, por causa de sua simplicidade.

Uma matriz de decisão pode ser então elaborada como mostra a Tabela IV a seguir:

**Tabela IV - Matriz de decisão para o mecanismo da junta do quadril**

| critérios | coef. importância | Juntas    |                     |                   |                  |
|-----------|-------------------|-----------|---------------------|-------------------|------------------|
|           |                   | primitiva | joystick cilíndrico | joystick esférico | “biela-manivela” |
| 1         | 6                 | 2         | 2                   | 2                 | 5                |
| 2         | 5                 | 2         | 2                   | 5                 | 4                |
| 3         | 5                 | 1         | 5                   | 5                 | 5                |
| 4         | 4                 | 2         | 5                   | 5                 | 5                |
| 5         | 3                 | 1         | 4                   | 3                 | 3                |
| 6         | 2                 | 5         | 1                   | 3                 | 2                |
| 7         | 1                 | 5         | 3                   | 3                 | 1                |
| Total:    |                   | 53        | 84                  | 100               | 109              |

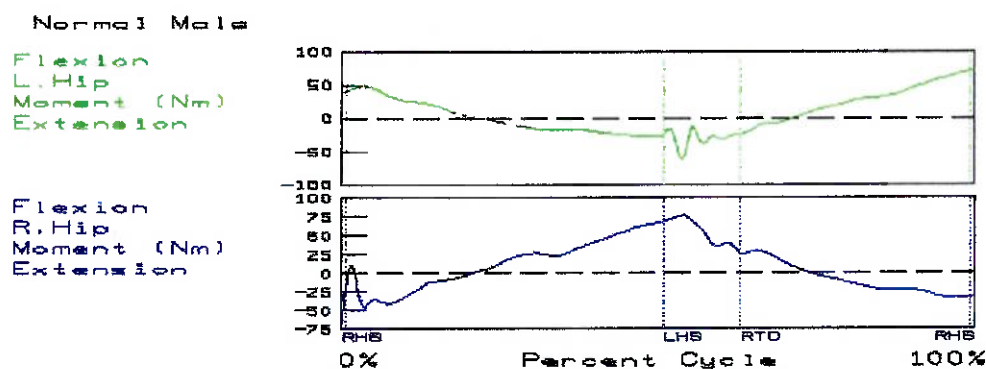
A junta escolhida, portanto, é a junta “biela-manivela”, principalmente devido ao seu desempenho no primeiro critério, fundamental para o bom funcionamento do robô.

## 5 DIMENSIONAMENTO DA JUNTA – MODELAGEM ESTÁTICA

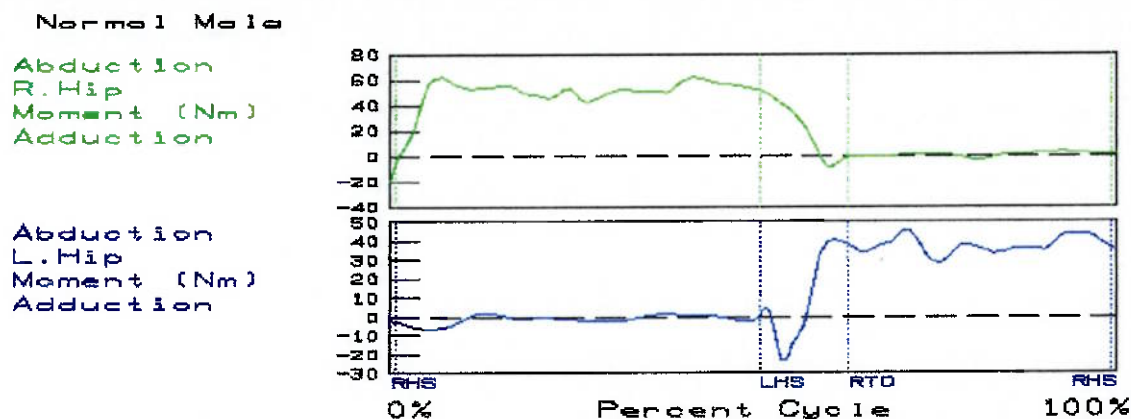
A modelagem estática do robô bípede visa a determinação do momento torçor máximo a que as juntas do quadril estarão sujeitas nos movimentos de flexão e extensão da coxa.

O software GaitLab fornece os valores dos momentos em cada uma das articulações de um homem em marcha normal para o ciclo completo de marcha através de gráficos e tabelas. Tendo o conhecimento destes valores, é possível determinar o instante do ciclo de marcha em que as juntas do quadril são solicitadas com maior intensidade, ou seja, os instantes em que os momentos nestas juntas atingem os seus valores máximos. O conhecimento do momento máximo na junta do quadril é de vital importância para o dimensionamento desta junta e escolha do servo utilizado para acionar o mecanismo.

A Figura 21 e a Figura 22 mostram os valores dos momentos nas juntas do quadril nos movimentos de flexão/extensão e abdução/adução da coxa, respectivamente. Analisando as figuras, conclui-se que o momento na junta é maior para os movimentos de flexão/extensão do que para os movimentos de abdução/adução. Desta forma, a junta do quadril será dimensionada considerando-se os movimentos de flexão/extensão da coxa.

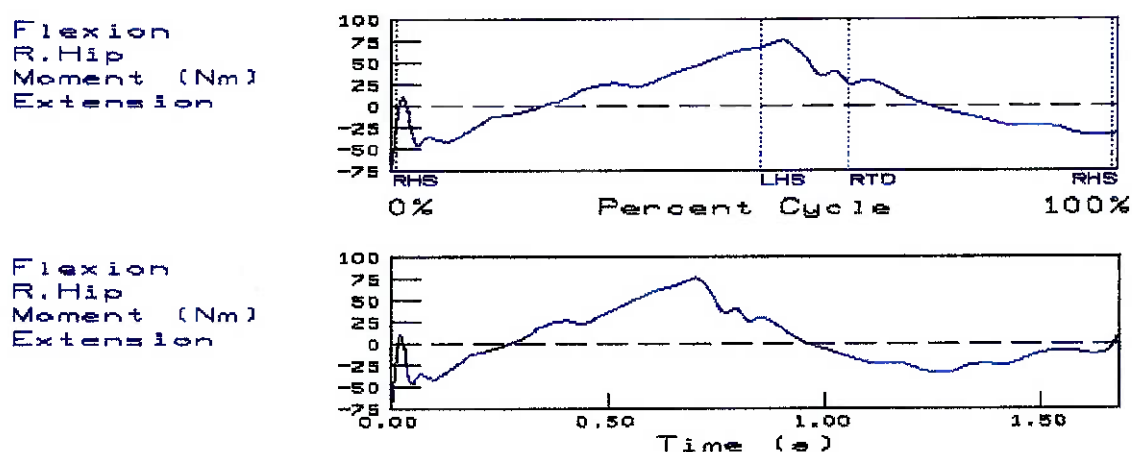


**Figura 21 - Momentos na junta do quadril devido aos movimentos de flexão/extensão**



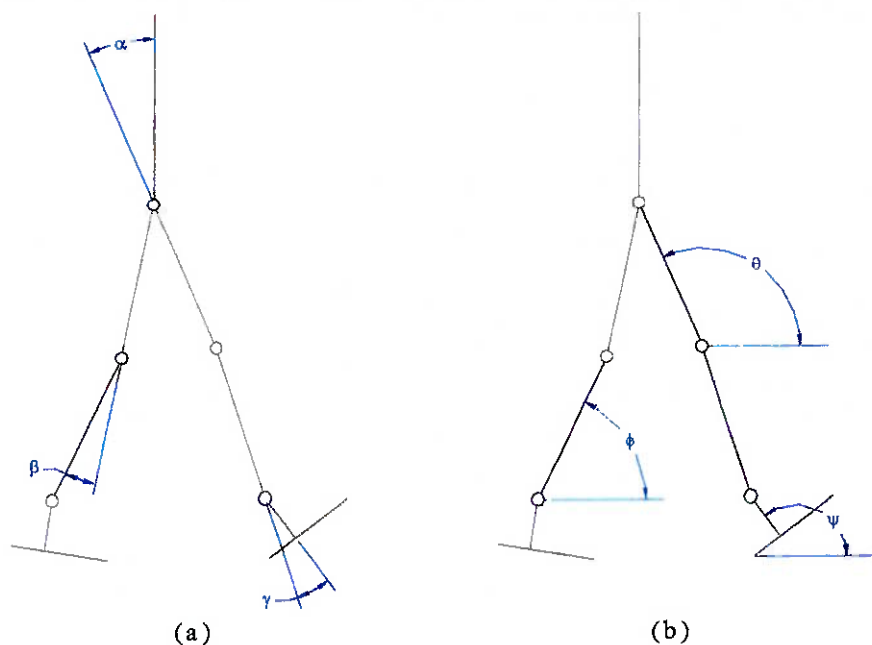
**Figura 22 - Momentos na junta do quadril devido aos movimentos de abdução/adução**

A Figura 23 mostra os resultados da simulação em GaitLab do ciclo completo de marcha de um homem normal, representando o momento em cada junta do quadril ao longo do ciclo. Observa-se que o momento máximo acontece no instante logo após em que o homem toca o calcanhar no solo (LHS). Este será, portanto, o instante do ciclo de marcha do qual serão obtidos os esforços e momentos na junta do quadril do robô. Do banco de dados gerado no GaitLab, observa-se que o instante em que isto ocorre é  $t = 0,70\text{ s}$ .



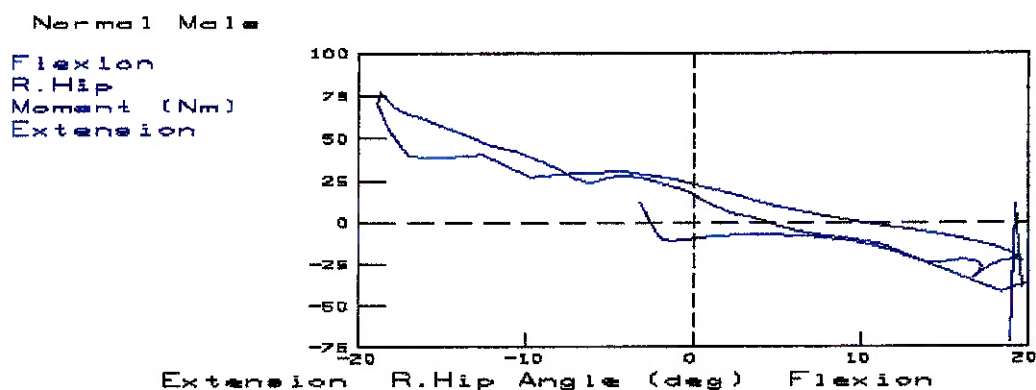
**Figura 23 - Momentos nas juntas do quadril em função do tempo**

A Figura 24 apresenta os ângulos entre os respectivos membros (ângulos relativos), que são os ângulos do quadril, do joelho e do tornozelo, além dos ângulos utilizados para o cálculo dos momentos (ângulos dos membros com a horizontal).

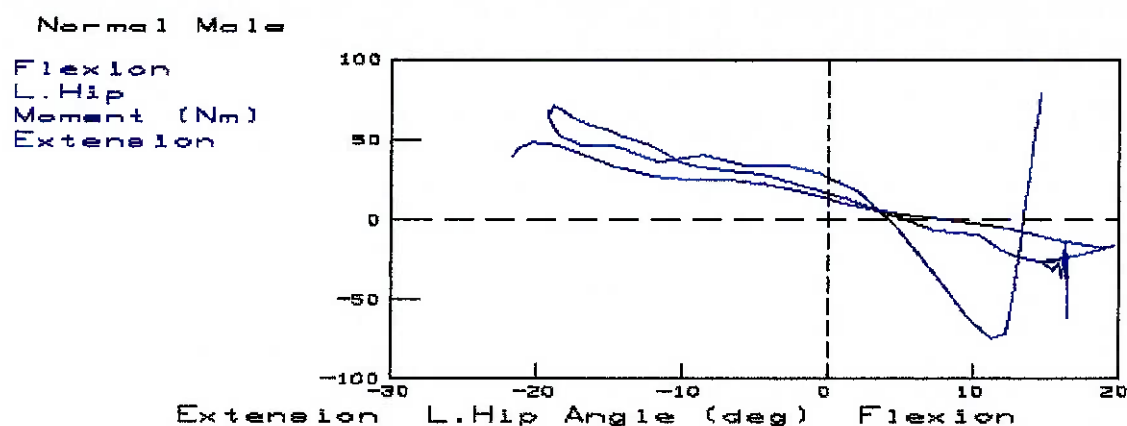


**Figura 24 - Ângulos relativos (a) e absolutos (b) em cada junta do robô**

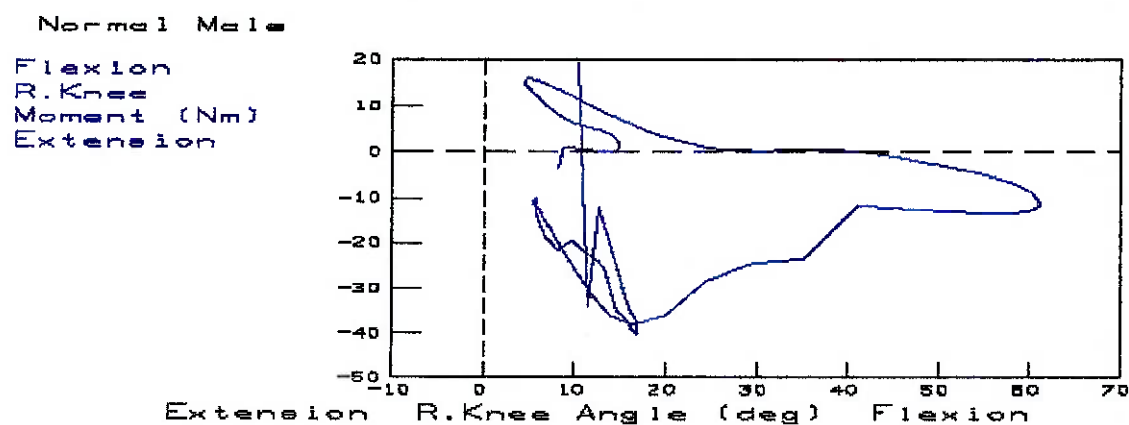
A Figura 25, a Figura 26, a Figura 27, a Figura 28, a Figura 29 e a Figura 30 mostram os ângulos entre os membros em cada uma das articulações para um homem normal em função dos respectivos momentos a que estas articulações estão submetidas.



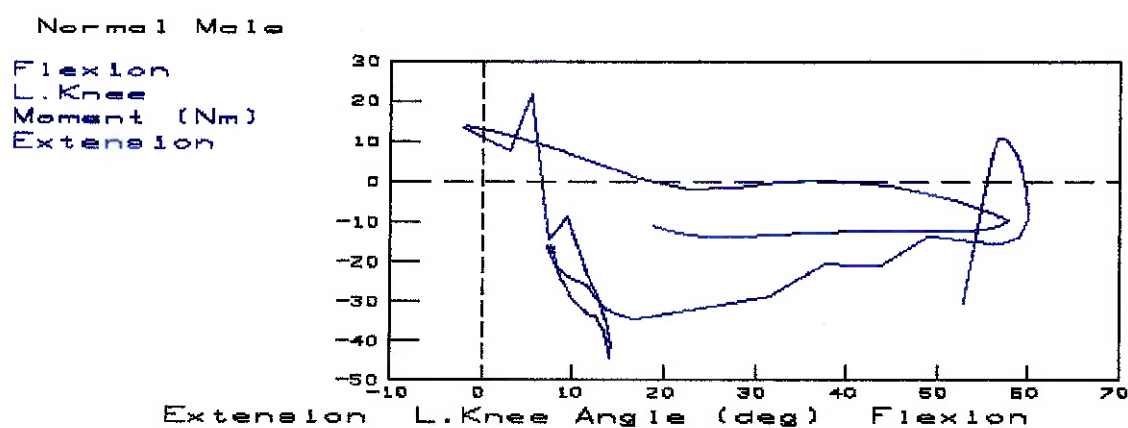
**Figura 25 - Momento em função do ângulo da junta do quadril direito**



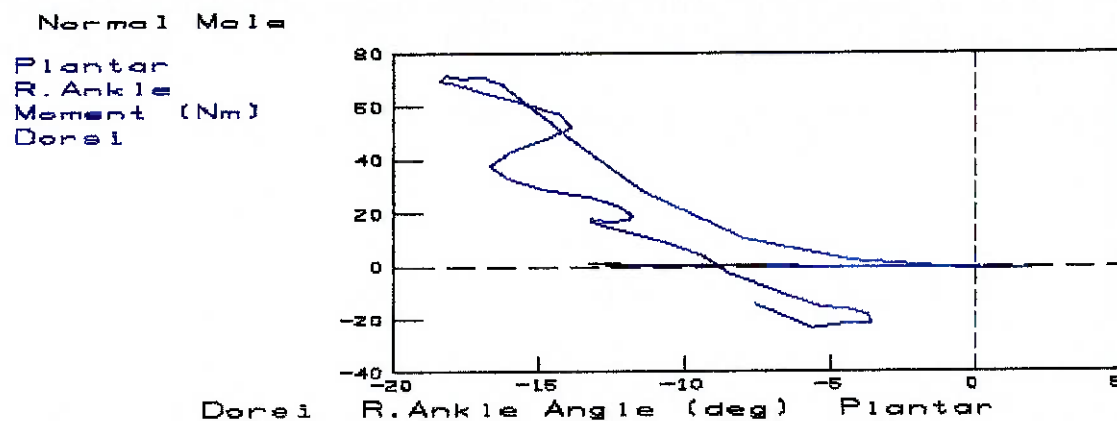
**Figura 26 - Momento em função do ângulo da junta do quadril esquerdo**



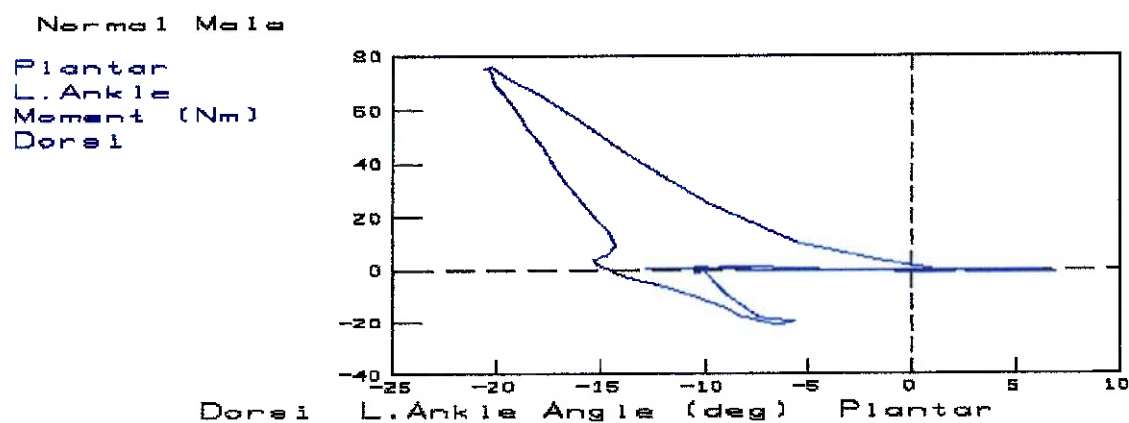
**Figura 27 - Momento em função do ângulo da junta do joelho direito**



**Figura 28 - Momento em função do ângulo da junta do joelho esquerdo**



**Figura 29 - Momento em função do ângulo da junta do tornozelo direito**



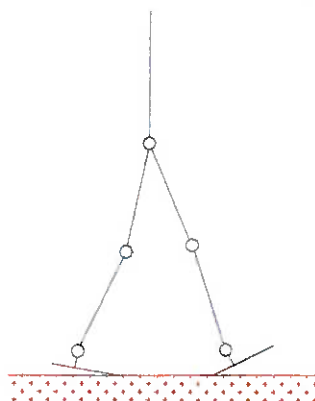
**Figura 30 - Momento em função do ângulo da junta do tornozelo esquerdo**

Para  $t = 0,70$  s, o GaitLab fornece os valores dos ângulos das juntas. A Tabela V mostra os valores destes ângulos em graus.

**Tabela V - Ângulos das juntas de um homem normal no instante em que o calcanhar esquerdo toca o solo**

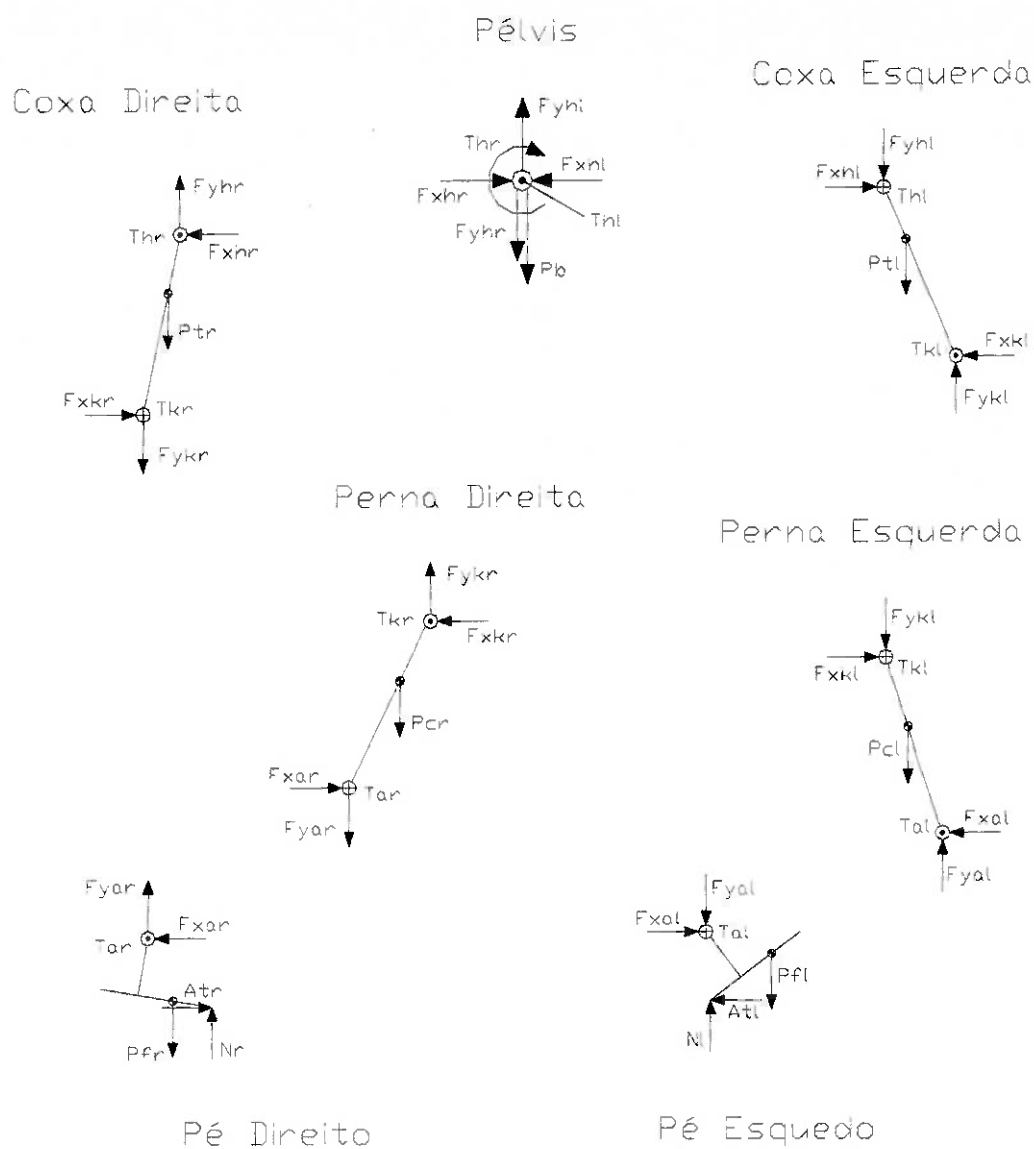
| Junta                           | Ângulo de abdução/adução (graus) |
|---------------------------------|----------------------------------|
| $\alpha_l$ (quadril esquerdo)   | -18,7                            |
| $\alpha_r$ (quadril direito)    | 16,5                             |
| $\beta_l$ (joelho esquerdo)     | 13,9                             |
| $\beta_r$ (joelho direito)      | 5,3                              |
| $\gamma_l$ (tornozelo esquerdo) | -16,3                            |
| $\gamma_r$ (tornozelo direito)  | -9,0                             |

A Figura 31 apresenta o robô no instante em que os momentos nas juntas do quadril são máximos (instante logo após ao que ele toca o calcanhar esquerdo no solo).



**Figura 31 - Esquema do robô na posição de máximo momento na junta do quadril**

Para efeito de modelagem estática, foram construídos os diagramas de corpo livre da pélvis, das coxas, pernas e pés (incluindo calcanhares) direito e esquerdos para o plano sagital (plano xy), conforme mostra a Figura 32.



**Figura 32 - Diagramas de corpo livre dos membros inferiores do robô**

O sistema de equações de equilíbrio estático apresenta as seguintes incógnitas:

$$\left. \begin{array}{ll}
 X_1 = F_{xhl} & X_{12} = T_{kr} \\
 X_2 = F_{yhl} & X_{13} = F_{xal} \\
 X_3 = T_{hl} & X_{14} = F_{yal} \\
 X_4 = F_{xhr} & X_{15} = T_{al} \\
 X_5 = F_{yhr} & X_{16} = F_{xar} \\
 X_6 = T_{hr} & X_{17} = F_{yar} \\
 X_7 = F_{xkl} & X_{18} = T_{ar} \\
 X_8 = F_{ykl} & X_{19} = N_l \\
 X_9 = T_{kl} & X_{20} = N_r \\
 X_{10} = F_{xkr} & X_{21} = At_l \\
 X_{11} = F_{ykr} & X_{22} = At_r
 \end{array} \right\} 22 \text{ incógnitas}$$

As equações de equilíbrio estático obtidas para os respectivos membros foram as seguintes:

Pélvis (pelvis):

$$F_{xhr} - F_{xhl} = 0 \quad (1)$$

$$-F_{yhr} + F_{yhl} = P_b \quad (2)$$

$$T_{hl} - T_{hr} = 0 \quad (3)$$

Coxa esquerda (left thigh):

$$-F_{xkl} + F_{xhl} = 0 \quad (4)$$

$$F_{ykl} - F_{yhl} = P_{tl} \quad (5)$$

$$-F_{xkl}L_{tl} \sin \theta_l - F_{ykl}L_{tl} \cos \theta_l + T_{kl} - T_{hl} = -P_{tl}G_{tl} \cos \theta_l \quad (6)$$

Coxa direita (right thigh):

$$F_{xkr} - F_{xhr} = 0 \quad (7)$$

$$-F_{ykr} + F_{yhr} = P_{tr} \quad (8)$$

$$F_{xkr}L_{tr} \sin \theta_r + F_{ykr}L_{tr} \cos \theta_r - T_{kr} + T_{hr} = -P_{tr}G_{tr} \cos \theta_r \quad (9)$$

Perna esquerda (left calf):

$$-F_{xal} + F_{xkl} = 0 \quad (10)$$

$$F_{yal} - F_{ykl} = P_{cl} \quad (11)$$

$$-F_{xal}L_{cl} \sin \phi_l - F_{yal}L_{cl} \cos \phi_l + T_{al} - T_{kl} = -P_{cl}G_{cl} \cos \phi_l \quad (12)$$

Perna direita (right calf):

$$F_{xar} - F_{xkr} = 0 \quad (13)$$

$$-F_{yar} + F_{ykr} = P_{cr} \quad (14)$$

$$F_{xar}L_{cr} \sin \phi_r + F_{yar}L_{cr} \cos \phi_r - T_{ar} + T_{kr} = -P_{cr}G_{cr} \cos \phi_r \quad (15)$$

Pé esquerdo (left foot):

$$-At_l + F_{xal} = 0 \quad (16)$$

$$-F_{yal} + N_l = P_{fl} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} At_l (0,333L_{fl} \cos \psi_l - L_{hl} \sin \psi_l) - N_l (L_{hl} \cos \psi_l + 0,333L_{fl} \sin \psi_l) - T_{al} = \\ = P_{fl} (0,107L_{fl} \sin \psi_l - L_{hl} \cos \psi_l) \end{aligned} \quad (18)$$

Pé direito (right foot):

$$At_r - F_{xar} = 0 \quad (19)$$

$$F_{yar} + N_r = P_{fr} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} At_r (0,667L_{fr} \cos \psi_r + L_{hr} \sin \psi_r) + N_r (0,667L_{fr} \sin \psi_r - L_{hr} \cos \psi_r) + T_{ar} = \\ = P_{fr} (L_{hr} \cos \psi_r - 0,107L_{fr} \sin \psi_r) \end{aligned} \quad (21)$$

Equações extras:

Equações de atrito nos pés:

$$At_l = \mu \cdot N_l \therefore At_l - \mu \cdot N_l = 0 \quad (22)$$

$$At_r = \mu \cdot N_r \therefore At_r - \mu \cdot N_r = 0 \quad (23)$$

onde  $\mu \approx 0,4$  (coeficiente de atrito entre o pé do robô e o solo).

Como se pode observar, o sistema montado tem 23 equações e 22 incógnitas, sendo, portanto, impossível resolvê-lo da maneira como ele se encontra. O sistema de equações acima foi implementado em MatLab (cf. APÊNDICE B) e foram testadas duas maneiras diferentes para resolvê-lo: a primeira utilizou a pseudoinversa da matriz que contém os coeficientes das incógnitas e a segunda desconsiderou uma das equações de atrito (a Equação 23), deixando a força de atrito  $At_r$  ser determinada através das equações de equilíbrio estático. Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela VI.

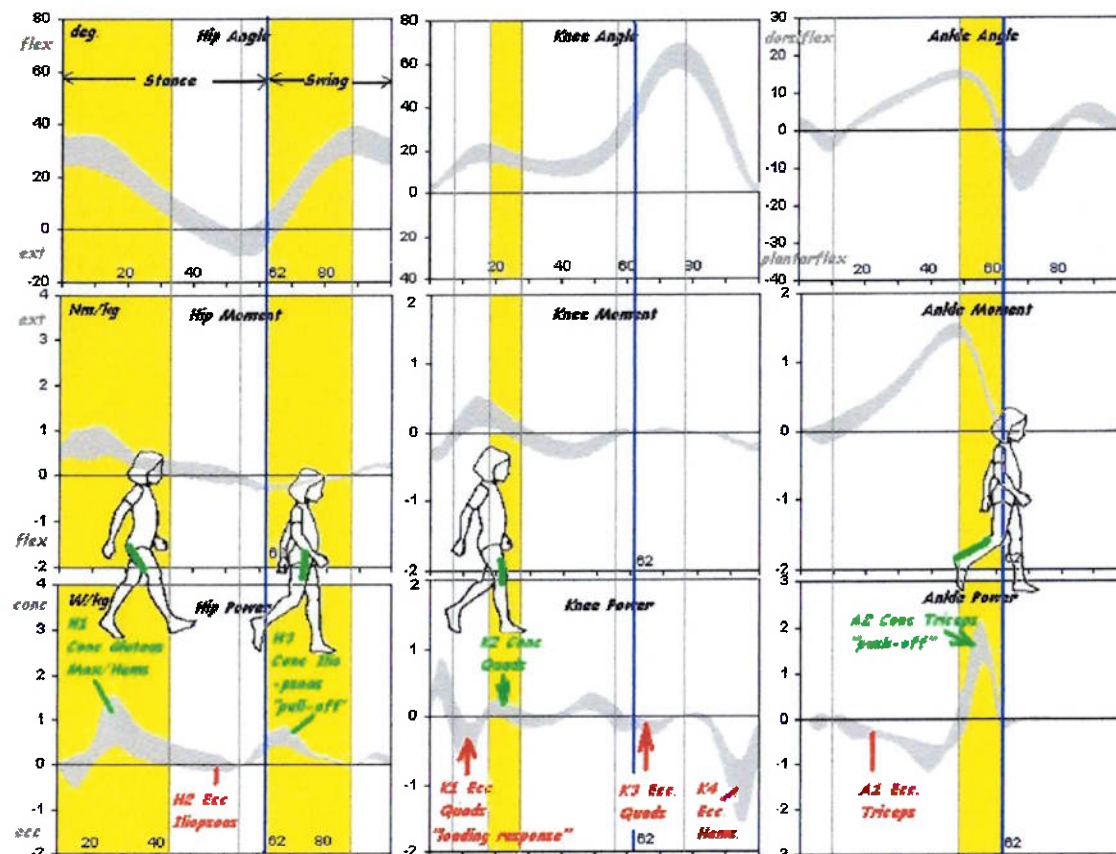
**Tabela VI - Soluções do sistema de equações para  $M_{\text{robô}} = 2,0 \text{ kg}$**

| Massa do robô: $M_{\text{robô}} = 2,0 \text{ kg}$ |           |           |            |           |           |
|---------------------------------------------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Incógnitas                                        | 1º método | 2º método | Incógnitas | 1º método | 2º método |
| $F_{xhl}$                                         | 3,9088    | 4,7282    | $T_{kr}$   | -1,1299   | -1,3904   |
| $F_{yhl}$                                         | 4,7094    | 6,6899    | $F_{xal}$  | 3,8847    | 4,7282    |
| $T_{hl}$                                          | -1,7807   | -2,3445   | $F_{yal}$  | 9,4470    | 11,4379   |
| $F_{xhr}$                                         | 3,9310    | 4,7282    | $T_{al}$   | -0,6569   | -0,8697   |
| $F_{yhr}$                                         | -4,6471   | -2,6688   | $F_{xar}$  | 3,9553    | 4,7282    |
| $T_{hr}$                                          | -1,7145   | -2,3445   | $F_{yar}$  | -9,3975   | -7,4169   |
| $F_{xkl}$                                         | 3,8866    | 4,7282    | $T_{ar}$   | -1,5058   | -1,2830   |
| $F_{ykl}$                                         | 7,9151    | 9,8978    | $N_l$      | 9,8173    | 11,8205   |
| $T_{kl}$                                          | -1,2628   | -1,6827   | $N_r$      | 9,7960    | 7,7995    |
| $F_{xkr}$                                         | 3,9531    | 4,7282    | $At_l$     | 3,9035    | 4,7282    |
| $F_{ykr}$                                         | -7,8528   | -5,8767   | $At_r$     | 3,9397    | 4,7282    |

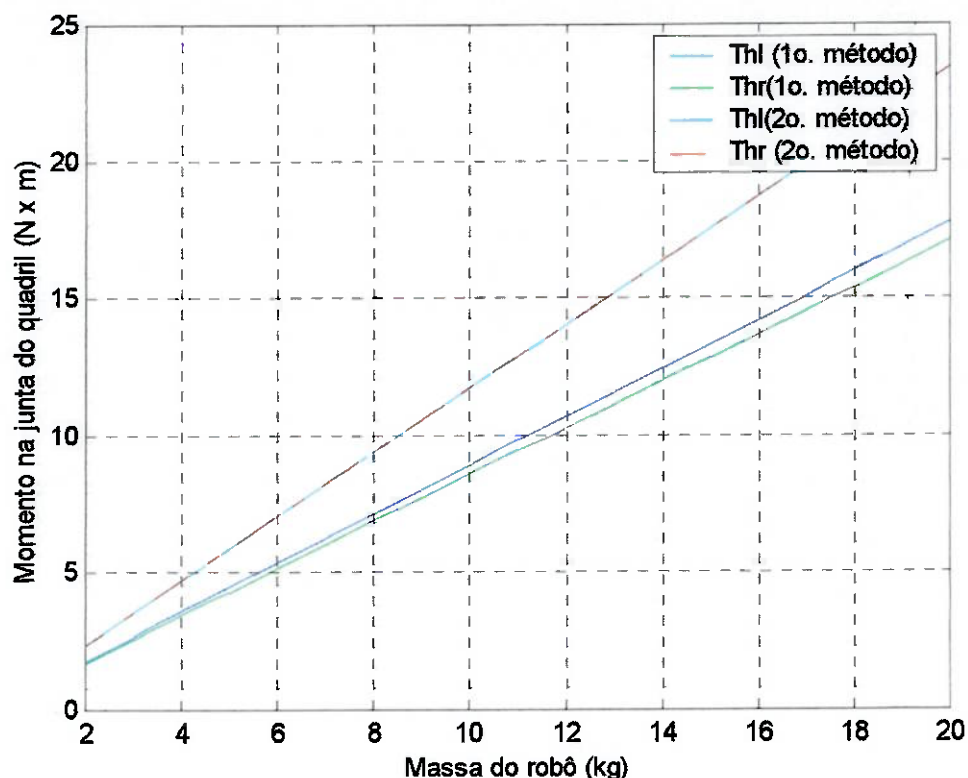
Da Tabela VI, observa-se que os valores obtidos para os momentos nas juntas do quadril nos dois métodos têm valores próximos de  $2 \text{ N} \times \text{m}$ . No pior dos casos (segundo método), momento aplicado é igual a  $2,345 \text{ N} \times \text{m}$ .

A Figura 33 mostra a comparação entre a massa corporal em  $\text{kg}$  e o momento aplicado na junta do quadril, no caso de um homem normal, além desta mesma comparação para as demais juntas. Analisando a Figura 33, verifica-se que a razão entre os momentos nas juntas do quadril e a massa da pessoa também é próxima da unidade. A Figura 34 apresenta a comparação entre a massa do robô em  $\text{kg}$  e o momento tursor aplicado na junta do quadril em  $\text{N} \times \text{m}$  obtida pela simulação em MatLAB. Isto mostra

que as solicitações de momento nas juntas do quadril do robô são as mesmas que numa pessoa normal, respeitando-se as relações entre as respectivas massas.



**Figura 33 - Relações entre os momentos em cada junta e o peso de uma pessoa durante o ciclo de marcha**

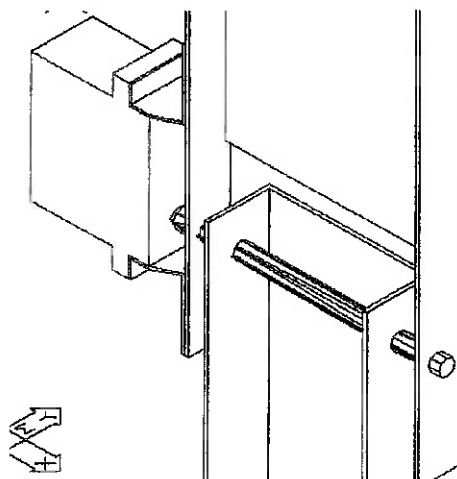


**Figura 34 - Relação entre o momento no quadril e a massa do robô**

Tendo em vista que a massa influencia diretamente o momento ao qual a junta do quadril está submetida (Figura 34), é de fundamental importância que se alcance a maior redução possível para a massa total do robô, ou o aumento do momento fornecido pelo servo, de forma a possibilitar os movimentos de flexão e extensão da junta em estudo. Uma alternativa para se aumentar o momento na junta do quadril seria o projeto de um sistema de redução na saída do eixo do servomotor, porém isto acarretaria a diminuição do curso angular deste servomotor, além de aumentar a complexidade do mecanismo e os custos de fabricação do robô. Assim, a escolha dos materiais para a estrutura do robô e dos componentes das juntas ganha uma importância fundamental no projeto.

## 6 MECANISMOS DO JOELHO E DO TORNOZELO DO ROBÔ

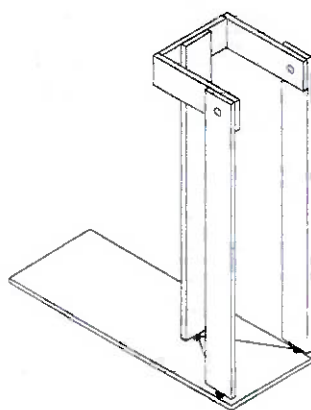
A junta do joelho do robô, conforme mostra a Tabela II, apresenta apenas um grau de liberdade (flexão e extensão da perna). Desta forma, seu mecanismo é bastante simples, consistindo apenas em uma articulação. A Figura 35 apresenta uma vista isométrica do mecanismo previamente selecionado para a junta do joelho. A Figura 35 mostra ainda a manutenção das características morfológicas do corpo humano, considerando a maneira como foi projetada esta junta, ou seja, preservando o alinhamento existente entre a coxa e a perna. Conforme será discutido na Seção 7, pequenas alterações foram feitas, de maneira a adequar o mecanismo às dimensões dos perfis de alumínio adquiridos para a construção do robô.



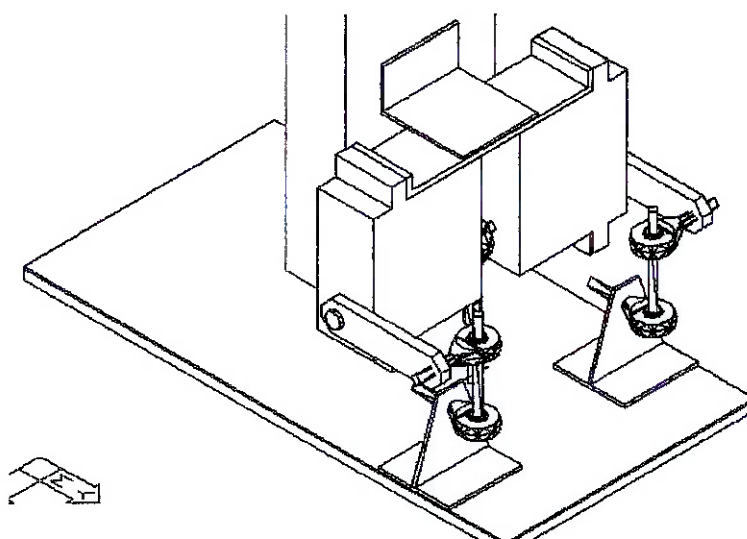
**Figura 35 - Mecanismo do joelho do robô**

A junta do tornozelo do robô foi projetada de forma a atender aos dois graus de liberdade para ela previstos pela Tabela II (inversão/eversão e flexão/extensão do pé). Assim como no caso do quadril, considerou-se altamente relevante o fato de se poder utilizar dois servos para atuar no movimento de flexão/extensão do pé, de forma a se

poder duplicar o torque no mesmo. Assim sendo, optou-se por um mecanismo semelhante ao utilizado para a junta do quadril, com o mesmo princípio de funcionamento. A Figura 36 mostra o desenho da maquete feita para este mecanismo, enquanto a Figura 37 ilustra o mesmo mecanismo, porém com alguns detalhes construtivos incorporados (faltando apenas alguns detalhes de fixação). Um estudo mais detalhado deste mecanismo foi realizado pelo outro grupo de alunos do curso de Engenharia Mecânica, portanto maiores detalhes a respeito deste mecanismo podem ser encontrados no volume 1 deste trabalho.



**Figura 36 - Modelo geométrico do mecanismo do tornozelo**



**Figura 37 - Mecanismo do tornozelo do robô**

## **7 SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA A CONSTRUÇÃO DOS MEMBROS INFERIORES DO ROBÔ**

Foram pesquisados alguns materiais possíveis de serem empregados na construção dos membros inferiores do robô bípede. A seleção do material a ser empregado na estrutura do robô levou em conta fatores como a rigidez, a massa específica e a usinabilidade do material. Os materiais pesquisados foram: celeron, nylon, PVC, poliuretano, fenolite e alumínio. Todos os materiais apresentam boa usinabilidade, se comparados, por exemplo, com os aços, materiais amplamente utilizados em elementos estruturais. No entanto, o alumínio é o material que apresenta a relação mais favorável entre a rigidez e a massa específica, além de ser facilmente encontrado no mercado na forma de perfis em “L”, “U”, “T”, tubos, tarugos, chapas, entre outros, o que facilita a sua utilização como elemento estrutural.

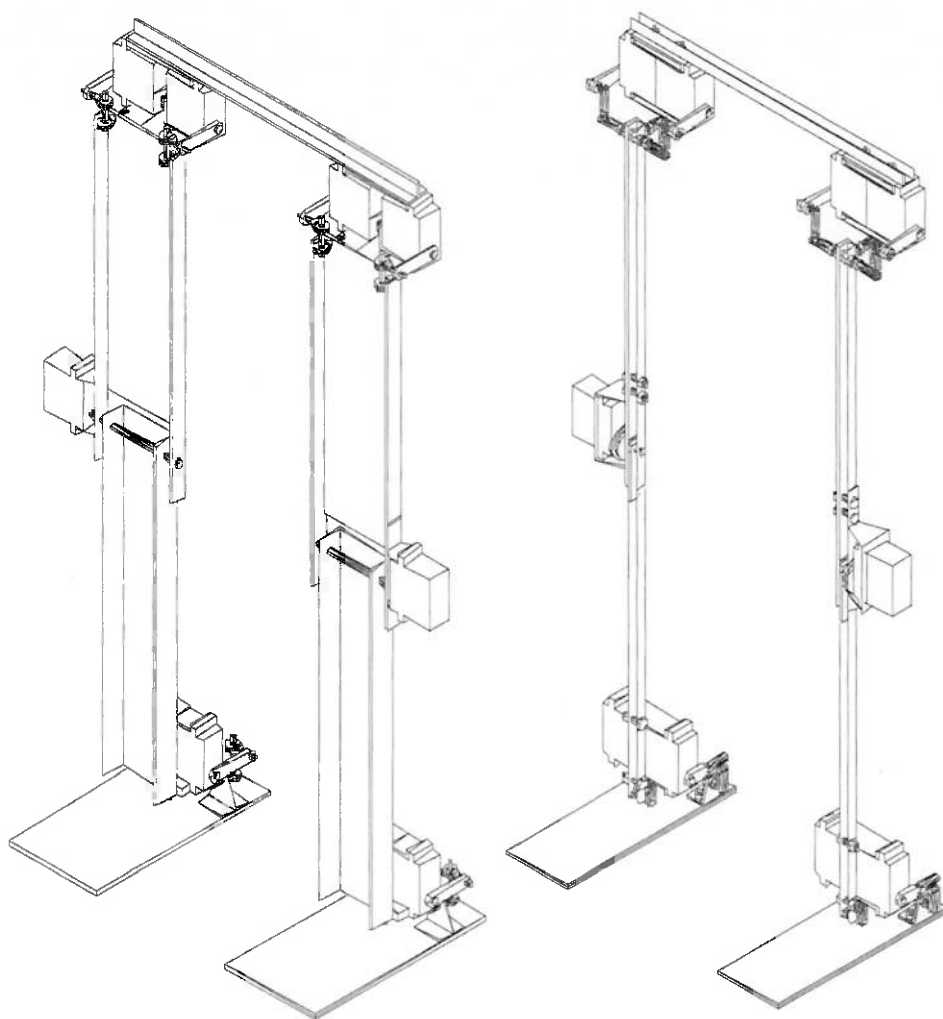
Durante a fase de seleção de materiais e projeto dos mecanismos das juntas do robô, levaram-se em consideração algumas características morfológicas do corpo humano, como por exemplo o alinhamento da coxa com a perna e a construção capaz de deixar os servos apenas com o papel dos músculos, ou seja, sem sofrer carregamento do peso do robô, deixando para as estruturas em alumínio (pernas, coxas e pés) esta função. Os desenhos de conjunto das juntas do robô apresentados na Seção 8 comprovam e ilustram este fato.

Desta forma, o material escolhido para a estrutura dos membros inferiores do robô bípede foi o alumínio. Foi consultado previamente um catálogo de perfis em “U”, “T” e em “L” da ASA Alumínio S.A. disponível na internet, visando a construção do robô, e que serviu como base para os primeiros desenhos com detalhes construtivos.

Porém, a dimensão dos perfis previamente escolhidos era grande demais, o que acarretava em um excesso de massa dos membros que deveria ser removido no processo de usinagem, causando aumento no custo de aquisição dos materiais e demora na construção do robô. Além disso, algumas dificuldades foram encontradas no momento de se adquirir estes produtos no mercado, pois os revendedores encontrados só

trabalhavam com grandes quantidades (1 tonelada, no mínimo), o que inviabilizou a utilização destes perfis específicos.

Para ilustrar este fato, foram realizados alguns cálculos comparativos da massa do robô. No primeiro caso, tomou-se como base os perfis de alumínio e os terminais rotulares pré-selecionados; no segundo caso, os perfis de alumínio e os terminais de barra posteriormente selecionados, conforme a Figura 38. Além disso, considerou-se a massa dos 10 servos de 153 g empregados. A massa total do robô encontrada no primeiro caso foi de 4,56 kg, impossibilitando a sua utilização devido à limitação do torque fornecido pelos servos (neste caso, necessita-se de um torque mínimo de  $5,0 N \times m$ , de acordo com a Figura 34, no entanto os dois servos juntos do mecanismo só podem fornecer de  $4,0 N \times m$ ). A massa encontrada no segundo caso foi de 2,39 kg, tornando, assim, suficiente a utilização de dois servos para a execução dos movimentos. A Tabela VII mostra os cálculos realizados.



**Figura 38 - Concepções inicial (à esquerda) e final (à direita) do robô**

**Tabela VII - Comparação de massa entre a primeira e a última concepção do robô**

| Elementos    | Peso (kg)         |                 |             |            |
|--------------|-------------------|-----------------|-------------|------------|
|              | Concepção inicial | Concepção final | Diferença   |            |
| Perfis       | 1,59              | 0,36            | 1,23        | 77%        |
| Terminais    | 1,44              | 0,5             | 0,94        | 65%        |
| Servos       | 1,53              | 1,53            | 0           | 0%         |
| <b>Total</b> | <b>4,56</b>       | <b>2,39</b>     | <b>2,17</b> | <b>48%</b> |

Assim, optou-se por utilizar perfis de alumínio com dimensões menores que as previamente consideradas, de forma a reduzir a massa do robô e eliminar a fase de remoção de material em excesso. Além disso, foram predefinidas dimensões mínimas

para a construção dos membros inferiores e, em seguida, foi feita uma pesquisa de preços de perfis de alumínio que atendessem a esses requisitos (comprimento, largura e espessura mínimos para cada tipo de perfil empregado no robô).

Os mecanismos do quadril e do tornozelo do robô, para permitirem dois graus de liberdade, necessitam, por razões construtivas, de rótulas e terminais rotulares. Foram consultados catálogos de fabricantes e optou-se pelos componentes da Termicom Indústria e Comércio de Terminais e Conexões Mecânicas Ltda. A Figura 39 mostra as rótulas e os terminais rotulares produzidos por esta empresa.



**Figura 39 - Rótulas e terminais rotulares a serem utilizados nas juntas do quadril e do tornozelo do robô**

Foram selecionadas previamente terminais rotulares conforme as mostradas na Figura 39 e nos primeiros desenhos com detalhes construtivos do robô (por exemplo, o desenho da Figura 37). Porém, devido ao esforço de redução da massa dos membros do robô e a conseqüente utilização de perfis de alumínio menores que os previamente selecionados, optou-se pela utilização de terminais de barra (tipo “cachimbo”) que, apesar de possuírem um custo maior, são mais compactos, exigindo menos espaço para a sua montagem, apresentam a mobilidade desejada e simplificam a construção das respectivas juntas (quadril e tornozelo).

A Figura 40 mostra o desenho de catálogo dos terminais de barra (tipo “cachimbo”) adquiridos para a construção do robô, e a linha destacada em azul na Tabela VIII mostra as dimensões dos respectivos terminais em polegadas.

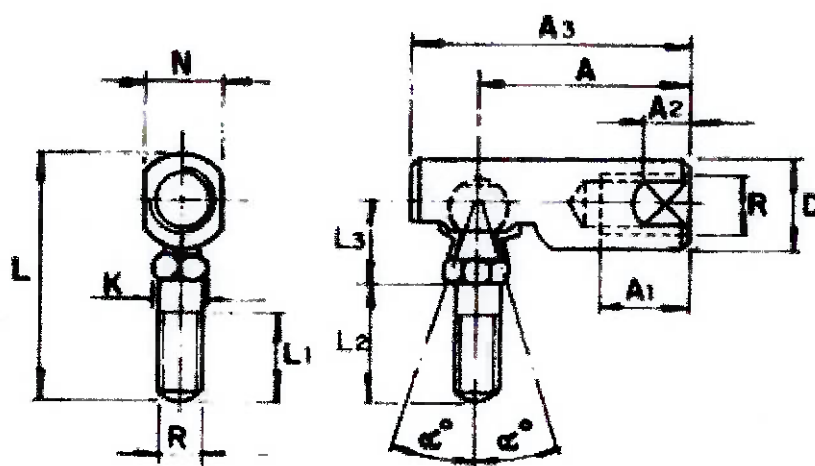
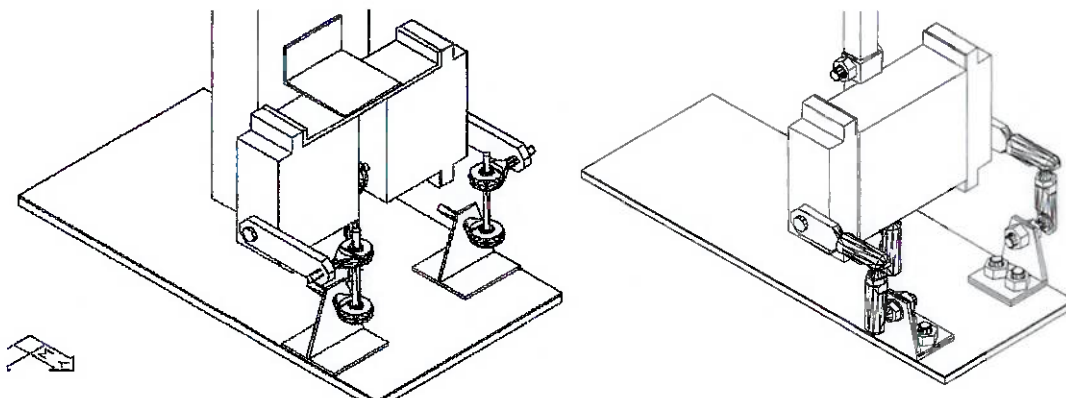


Figura 40 - Terminais de barra adquiridos para a construção do robô

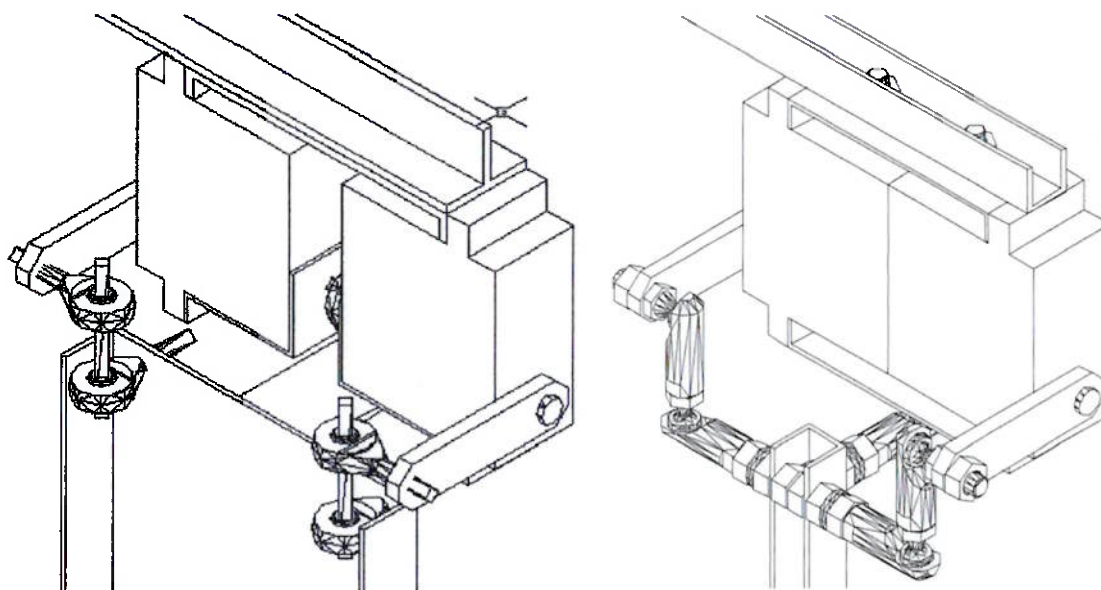
Tabela VIII- Dimensões dos terminais de barra adquiridos

| Dimensões                   |       |      |      |      |    |      |      |      |      |      |      |                | Peso grs. | Designação   |
|-----------------------------|-------|------|------|------|----|------|------|------|------|------|------|----------------|-----------|--------------|
| R                           | D     | N    | A    | A1   | A2 | A3   | L    | L1   | L2   | L3   | K    | $\alpha^\circ$ |           |              |
| M 5x0,8                     | 3/8"  | 8,0  | 22,4 | 12,5 | 4  | 28,5 | 25,3 | 10,5 | 11,2 | 9,3  | 8,0  | 20°            | 15        | TB 05 MND    |
| M 6x1,0                     | 7/16" | 9,5  | 24,6 | 13,5 | 5  | 31,5 | 32,0 | 13,0 | 14,2 | 12,0 | 9,5  | 21°            | 25        | TB 06 MND    |
| M 8x1,25                    | 1/2"  | 11,0 | 28,4 | 15,5 | 6  | 37,5 | 37,5 | 15,5 | 17,5 | 13,6 | 11,0 | 20°            | 38        | TB 08 MND    |
| M 10x1,5                    | 5/8"  | 14,0 | 36,0 | 20,5 | 8  | 45,0 | 47,0 | 20,5 | 22,4 | 16,7 | 12,7 | 18°            | 72        | TB 10 MND    |
| M 12x1,75                   | 3/4"  | 17,5 | 49,5 | 26,5 | 10 | 61,0 | 58,7 | 25,5 | 28,4 | 20,8 | 15,9 | 15°            | 150       | TB 12 MND    |
| <b>Bitolas em polegadas</b> |       |      |      |      |    |      |      |      |      |      |      |                |           |              |
| 10 - 32                     | 3/8"  | 8,0  | 22,4 | 12,5 | 4  | 28,5 | 25,3 | 10,5 | 11,2 | 9,3  | 8,0  | 20°            | 15        | TB 3/16" PFD |
| 1/4" - 28                   | 7/16" | 9,5  | 24,6 | 13,5 | 5  | 31,5 | 32,0 | 13,0 | 14,2 | 12,0 | 9,5  | 21°            | 25        | TB 1/4" PFD  |
| 5/16" - 24                  | 1/2"  | 11,0 | 28,4 | 15,5 | 6  | 37,5 | 37,5 | 15,5 | 17,5 | 13,6 | 11,0 | 20°            | 38        | TB 5/16" PFD |
| 3/8" - 24                   | 5/8"  | 14,0 | 36,0 | 20,5 | 8  | 45,0 | 47,0 | 20,5 | 22,4 | 16,7 | 12,7 | 18°            | 72        | TB 3/8" PFD  |
| 1/2" - 20                   | 3/4"  | 17,5 | 49,5 | 26,5 | 10 | 61,0 | 58,7 | 25,5 | 28,4 | 20,8 | 15,9 | 15°            | 150       | TB 1/2" PFD  |

O terminal de barra selecionado deveria apresentar no mínimo uma mobilidade angular  $\alpha$  de  $20^\circ$  (conforme mostra a Figura 40), justificando a escolha das dimensões destacadas em azul na Tabela VIII.



**Figura 41 - Mecanismo do tornozelo: concepção inicial (à esquerda) e concepção final (à direita)**



**Figura 42 – Mecanismo do quadril: concepção inicial (à esquerda) e concepção final (à direita)**

## 8 DESENHOS DE CONJUNTO E DE MONTAGEM DO ROBÔ E DE SUAS JUNTAS

Esta seção apresenta desenhos de conjunto do robô bípede, assim como os desenhos das juntas do quadril, do joelho e do tornozelo em várias vistas. Foram feitos também os desenhos de fabricação das peças do robô, porém estes não estão apresentados neste trabalho, tendo em vista que eles foram elaborados apenas para a fabricação das peças. É necessário ressaltar que estes desenhos foram feitos após a aquisição dos perfis de alumínio, terminais de barra e elementos de fixação (porcas, parafusos e arruelas).

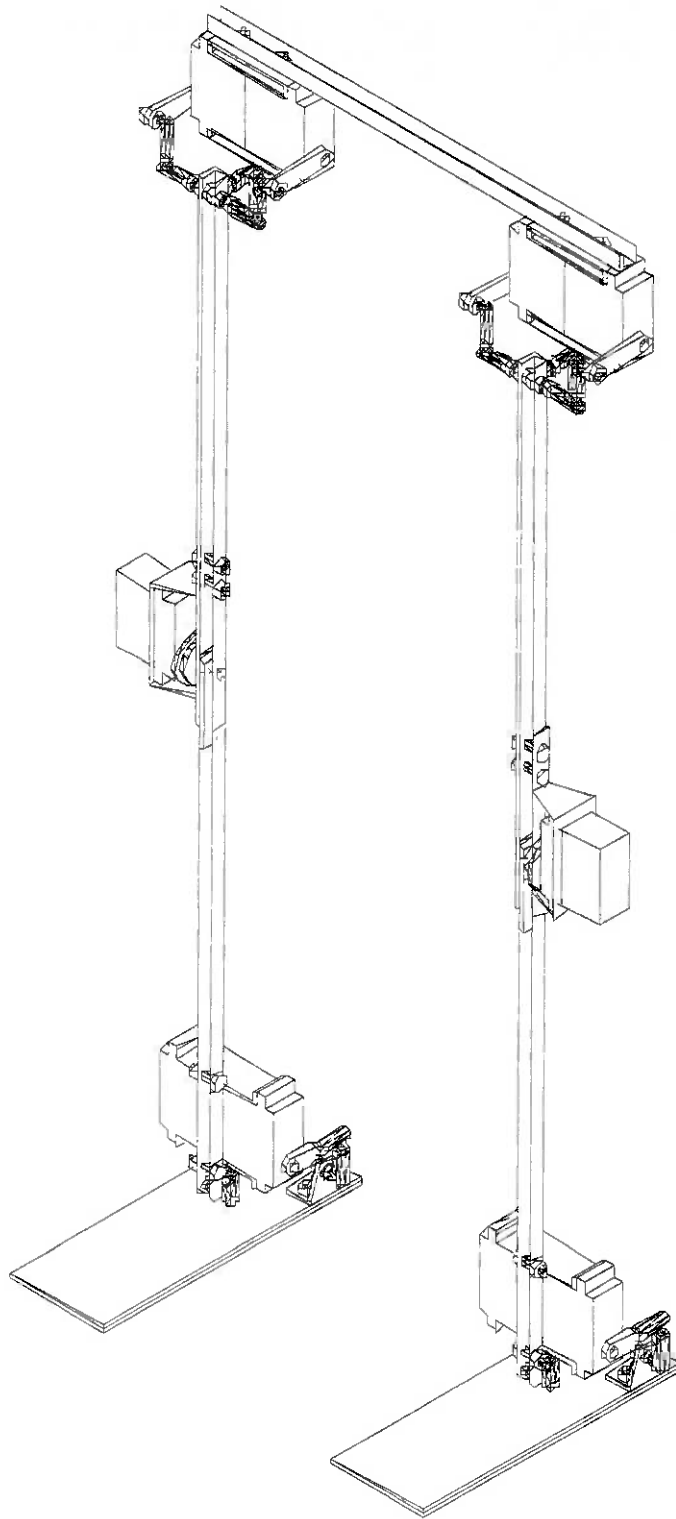
As dimensões de todos os membros do robô foram definidas pelas relações indicadas na Figura 3. Tendo em vista que o robô deveria ser construído em escala natural, adotou-se como base o valor  $H = 1,70\text{ m}$ .

### 8.1 *Desenhos de conjunto*

As figuras a seguir apresentam desenhos de conjunto dos mecanismos projetados para as diferentes juntas do robô bípede.

#### 8.1.1 Robô por inteiro

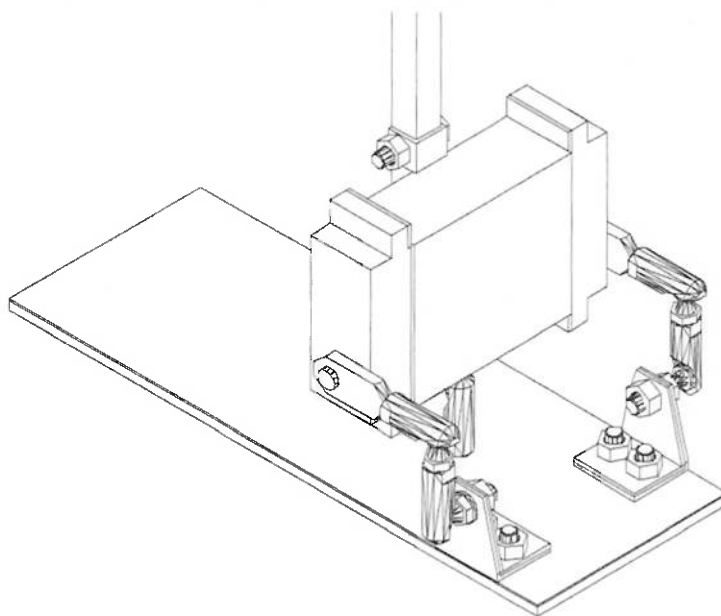
A Figura 43 mostra a vista isométrica do robô, apresentando de uma maneira geral as fixações dos membros e das juntas do quadril, do joelho e do tornozelo.



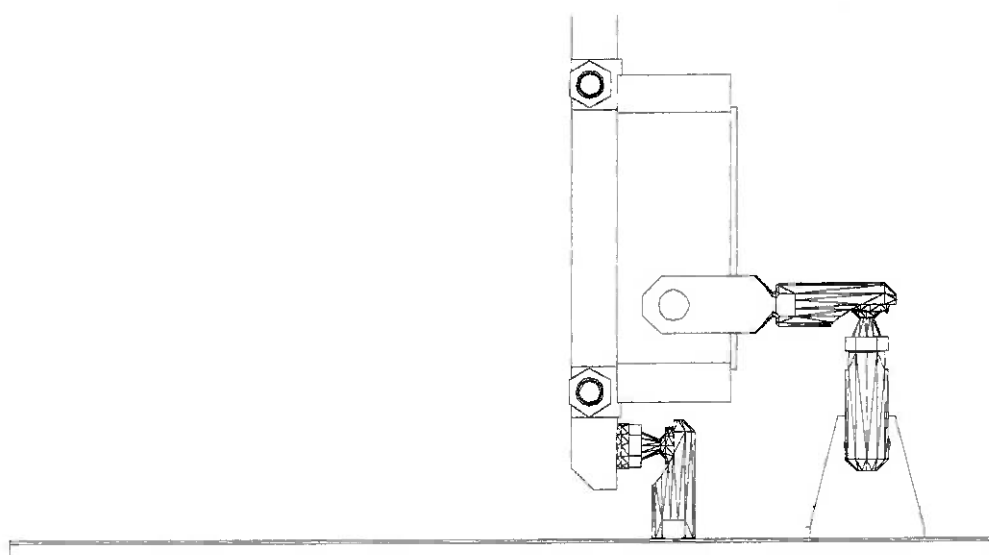
**Figura 43 - Desenho de conjunto do robô**

### 8.1.2 Tornozelo

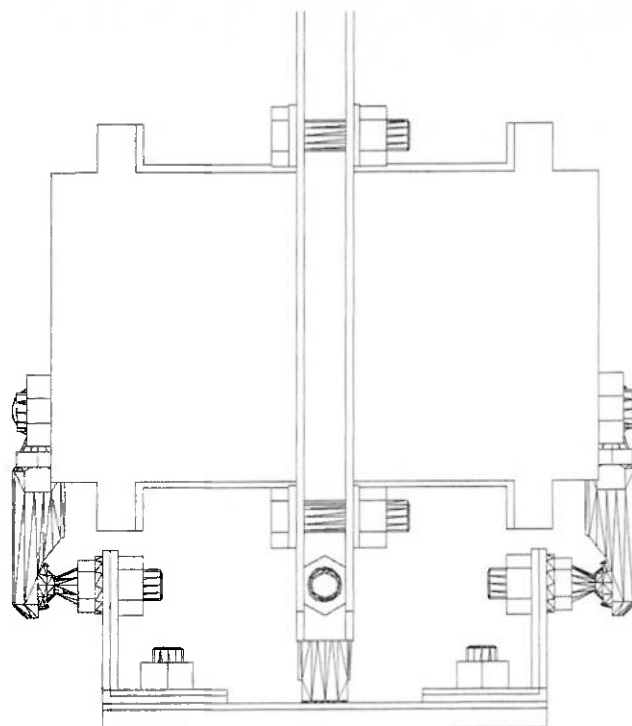
A Figura 44 apresenta uma vista isométrica do mecanismo da junta do tornozelo. A Figura 45, uma vista lateral desta junta, enquanto a Figura 46, uma vista frontal e a Figura 47, uma vista traseira.



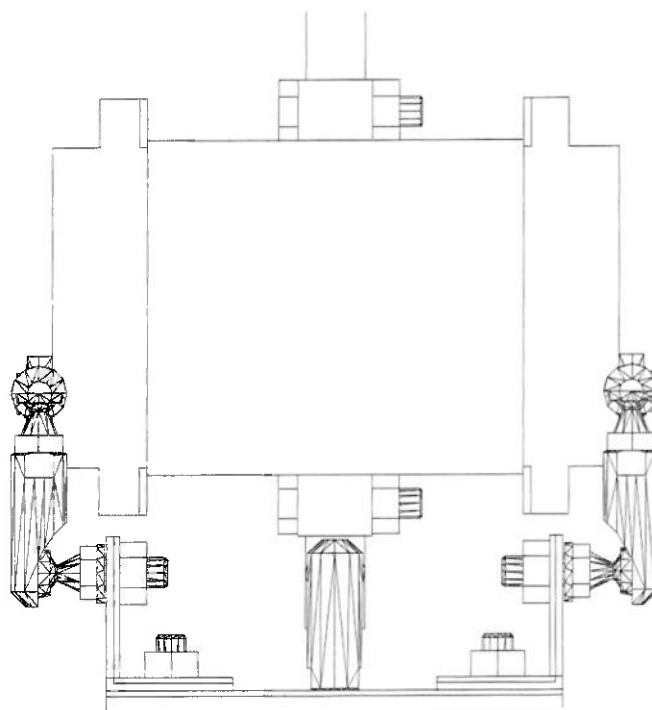
**Figura 44 - Desenho de conjunto do tornozelo – vista isométrica**



**Figura 45 – Desenho de conjunto do tornozelo – vista lateral**



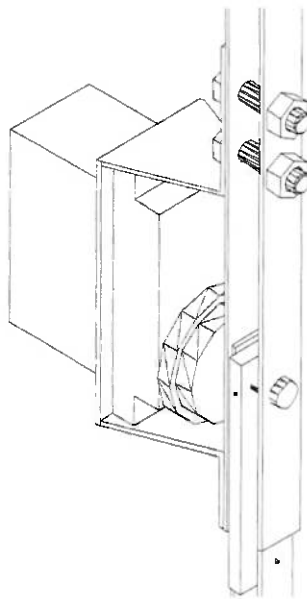
**Figura 46 – Desenho de conjunto do tornozelo – vista frontal**



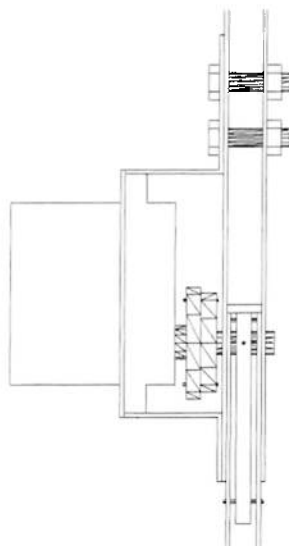
**Figura 47 – Desenho de conjunto do tornozelo – vista traseira**

### 8.1.3 Joelho

A Figura 48 apresenta uma vista isométrica da junta do joelho do robô, enquanto a Figura 49, uma vista frontal da mesma.



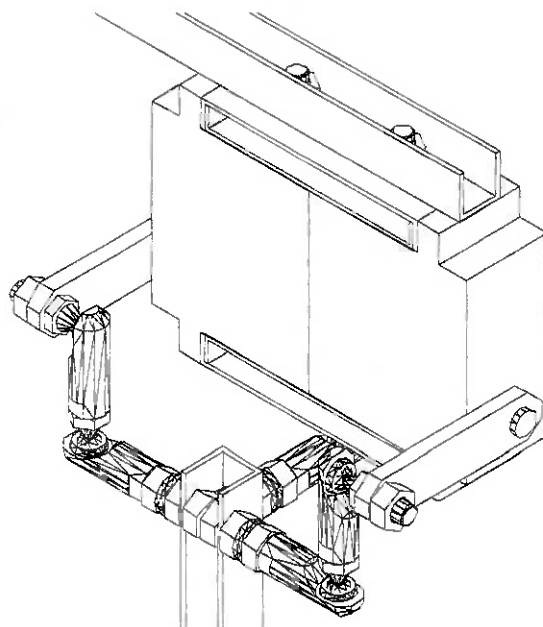
**Figura 48 – Desenho de conjunto do joelho – vista isométrica**



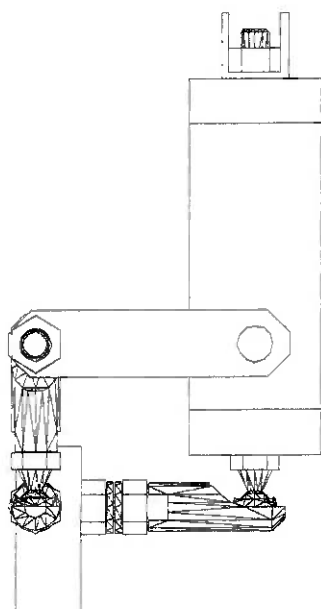
**Figura 49 - Desenho de conjunto do joelho - vista frontal**

### 8.1.4 Quadril

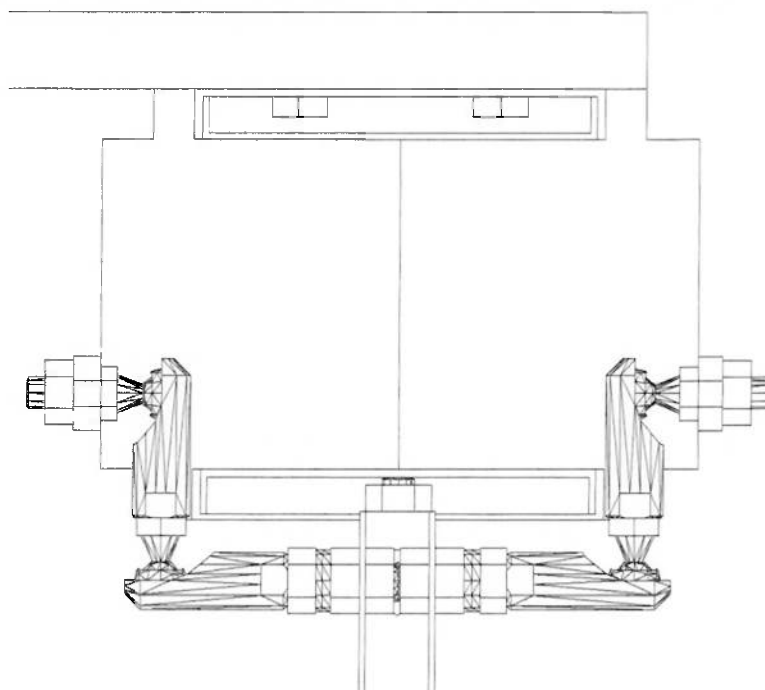
A Figura 50 apresenta a vista isométrica da junta do quadril do robô. A Figura 51, uma vista lateral desta junta, enquanto a Figura 52, uma vista frontal e a Figura 53, uma vista traseira.



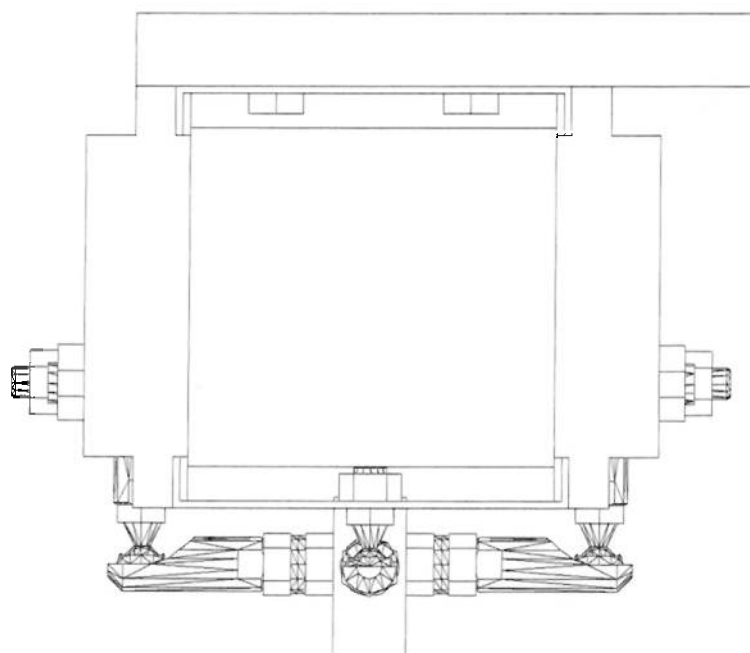
**Figura 50 - Desenho de conjunto do quadril - vista isométrica**



**Figura 51 - Desenho de conjunto do quadril - vista lateral**



**Figura 52 - Desenho de conjunto do quadril - vista frontal**



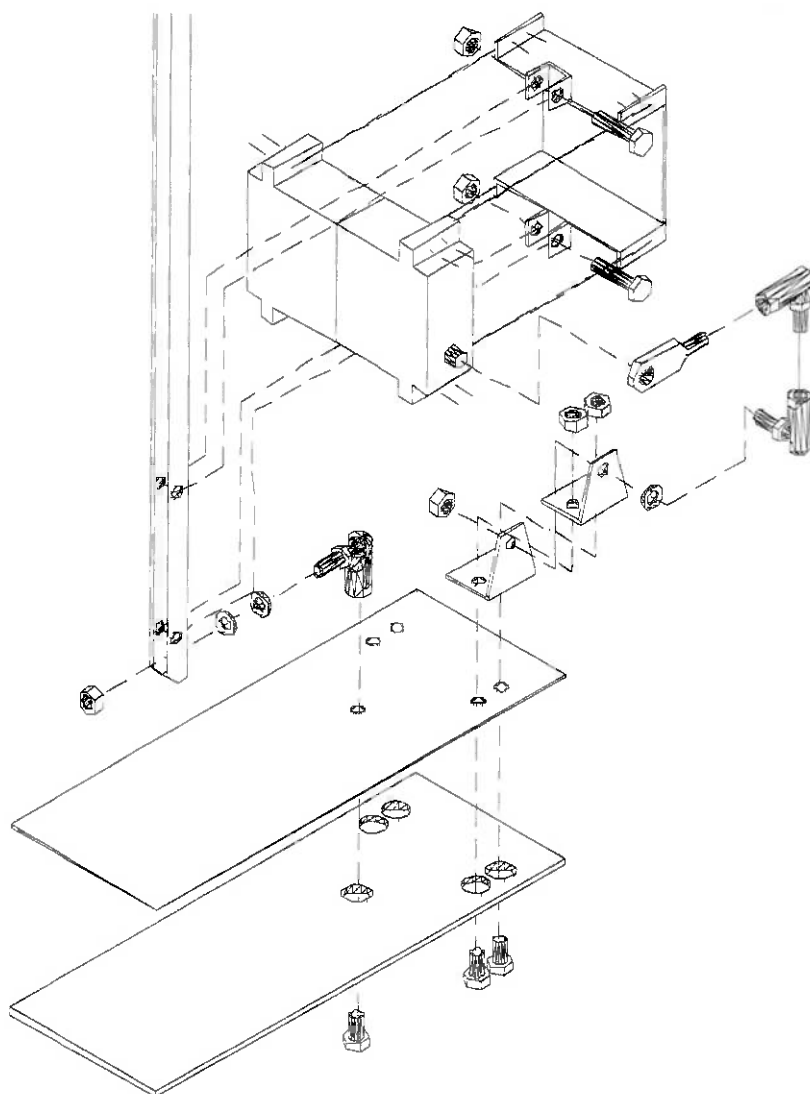
**Figura 53 - Desenho de conjunto do quadril - vista traseira**

## 8.2 Desenhos de montagem

As figuras a seguir apresentam desenhos de montagem dos mecanismos projetados para as diferentes juntas do robô bípede.. Na Figura 54 e na Figura 56, foi omitida uma parte do mecanismo, devido à simetria do mesmo e para evitar poluição do desenho.

### 8.2.1 Tornozelo

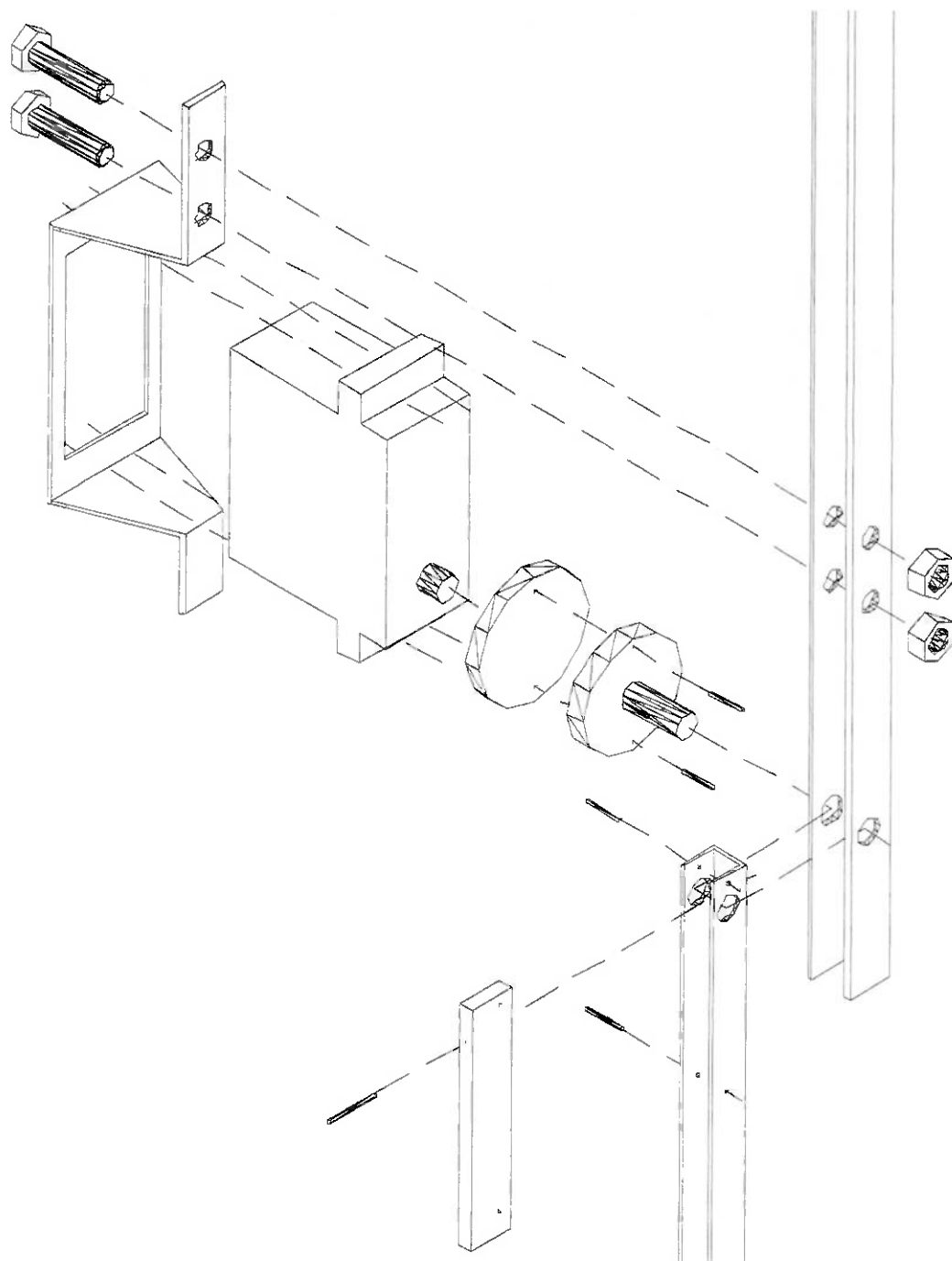
A Figura 54 apresenta o desenho de montagem do conjunto coxa-tornozelo-pé.



**Figura 54- Desenho de montagem do conjunto "coxa-tornozelo-pé"**

### 8.2.2 Joelho

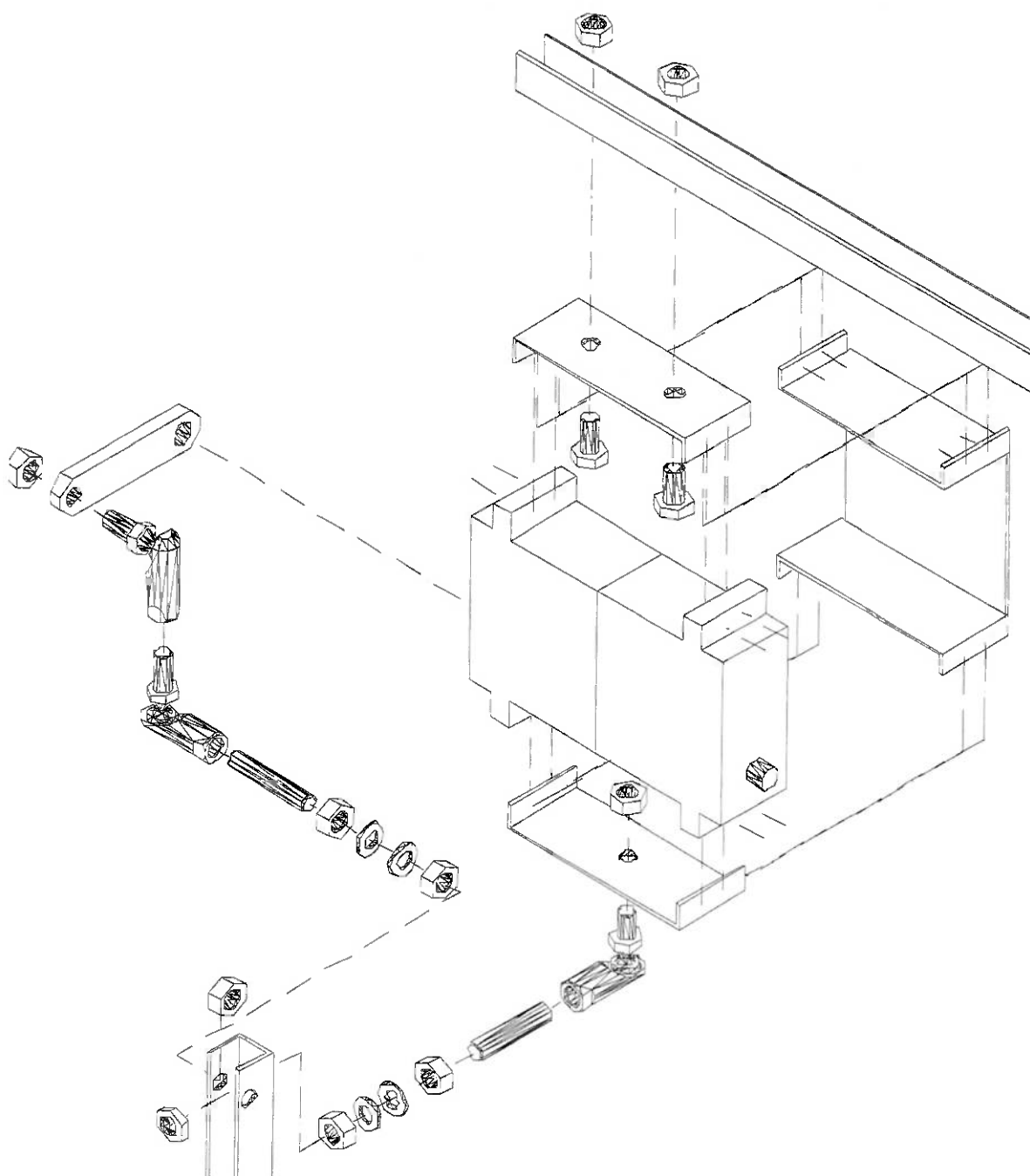
A Figura 55 apresenta o desenho de montagem do conjunto coxa-jelho-perna.



**Figura 55 – Desenho de montagem do conjunto "coxa-jelho-perna"**

### 8.2.3 Quadril

A Figura 56 apresenta o desenho de montagem do conjunto pélvis-quadril-coxa.



**Figura 56 – Desenho de montagem do conjunto "pélvis-quadril-coxa"**

## 9 CONCLUSÕES

Com os materiais e componentes empregados, foi possível uma redução expressiva nos custos de construção do robô bípede, de forma a se chegar a um valor inferior a R\$3.000,00. Assim, o projeto atendeu à motivação apresentada inicialmente.

Um outro fator importante de se destacar é a seleção dos mecanismos das juntas do quadril, do joelho e do tornozelo do robô, que consumiram a maior parte do tempo durante este projeto. Apesar de os mecanismos do quadril e do tornozelo possuírem uma cinemática complexa em relação aos previamente estudados, os mecanismos escolhidos apresentam grandes facilidades de fabricação, pois os elementos mais complexos (terminais de barra) podem ser adquiridos diretamente de fabricantes através de consultas a catálogos.

Além disso, conseguiu-se a construção de um robô com elevada semelhança morfológica ao corpo humano, seja pelas suas dimensões, seja pelas suas características funcionais, isto é, os servos desempenhando o papel dos músculos (aplicar o movimento angular entre os membros) e a estrutura em alumínio desempenhando o papel dos ossos (sustentar a massa corporal).

Por fim, o trabalho ora realizado pode representar um passo inicial para o estudo clínico da marcha humana (desenvolvimento de próteses, por exemplo), envolvendo diversas áreas do conhecimento da Engenharia (Mecânica, Mecatrônica, Elétrica e Bioengenharia), além de promover o desenvolvimento de habilidades pouco exploradas em sala de aula (contato com fabricantes e fornecedores, pesquisas de preços e o trabalho integrado com alunos de vários departamentos desta Escola).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Asada, H. & Slotine, J. J. E., "Robot Analysis and Control", 4<sup>th</sup> Edition, John Wiley & Sons Inc., U.S.A, 1986.
- [2] Beggs, J.S., "Mechanism", McGraw-Hill, New York, 1955.
- [3] Bloch, A., "A Lei de Murphy e Outros Motivos Por Que Tudo Dá Errado!", 18<sup>a</sup> Edição, Editora Record, Rio de Janeiro, 1977
- [4] Ching-Log Shih, "The Dynamics and Control of a Biped Walking Robot with Seven Degrees of Freedom", Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 118 n° 4, pp. 683-690, December, 1996.
- [5] Huang, Q., Yokoi, K., Kajita, S., Kaneko, K., Arai, H., Koyachi, N. & Tanie, K., "Planning Walking Patterns for a Biped Robot", IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.17, no. 3, pp. 280-288, June, 2001.
- [6] Long, C. & Chiou, C. J., "The Motion Control of a Statically Stable Biped Robot on an Uneven Floor", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-PART B: Cybernetics, vol. 28, no. 2, pp. 244-249, April 1998.
- [7] Lum, H. K., Zribi, M. & Soh, Y. C., "Planning and Control of Biped Robot", International Journal of Engineering science, vol 37, pp.1319-1349, 1999.
- [8] Sardain, P., Rostami, M. & Bessonnte, G., "An Anthropomorphic Biped Robot: Dynamic Concepts and Technological Design", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-PART A: Systems and Humans, vol. 28, no. 6, pp. 823-837, November 1998.
- [9] Sardain, P., Rostami, M. & Bessonnte, G., "Biped Robots: Correlation Between Technological Design and Behavior", Control Engineering Practise, vol.7, pp. 401-411, 1999.
- [10] Valle, A. P., Pagnotta, M., "Projeto Mecânico e Construção de um Robô Bípede para a Reprodução da Marcha Humana Autônoma", Vol. 1, EPUSP, São Paulo, 2002
- [11] Vaughan, C. L., Davis, B. L. & O'Connor, J. C., "Dynamics of Human Gait", Human Kinetics Publishers, Illinois, 1992.
- [12] Winter, D. A. "Biomechanics and Motor Control of human Movement", 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons Inc., Toronto, 1990.

## APÊNDICE A

### Fotos do robô construído

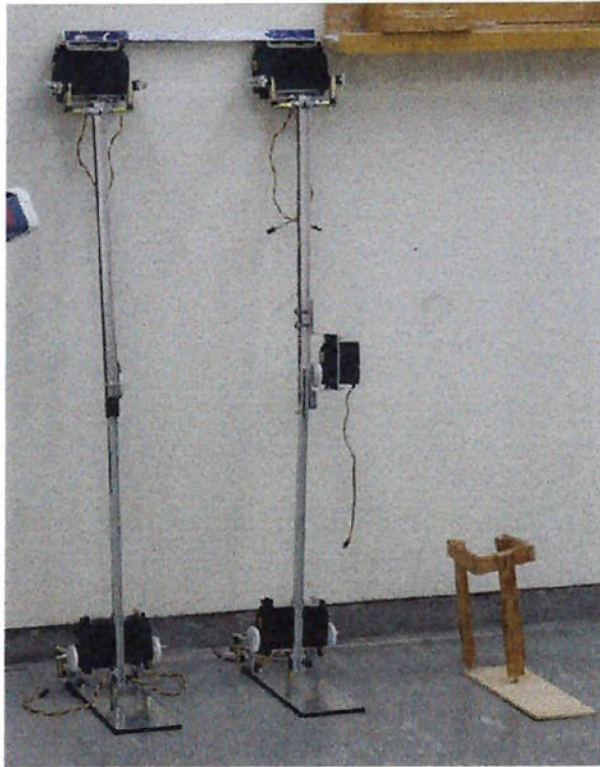


Foto 1 - Robô por inteiro

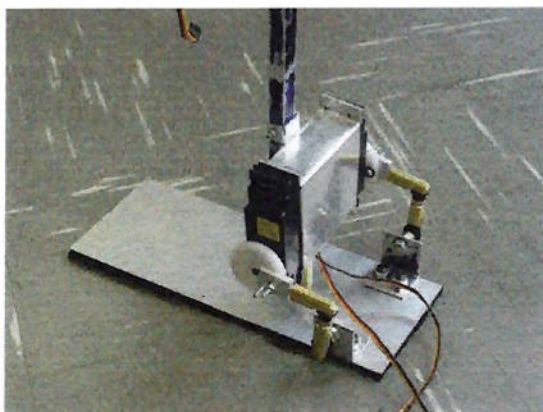
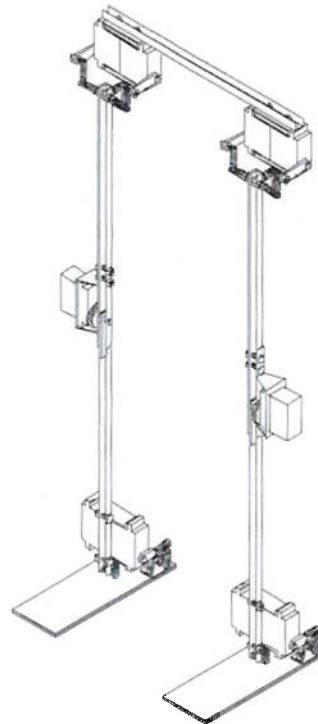
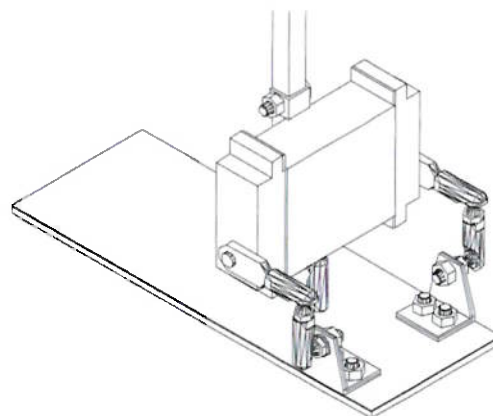
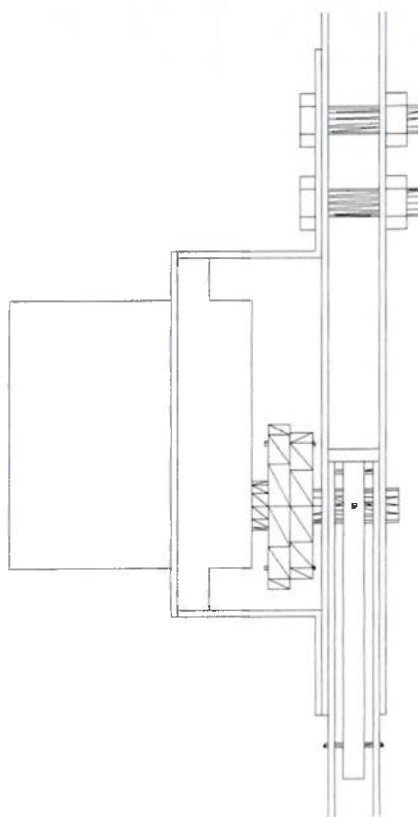
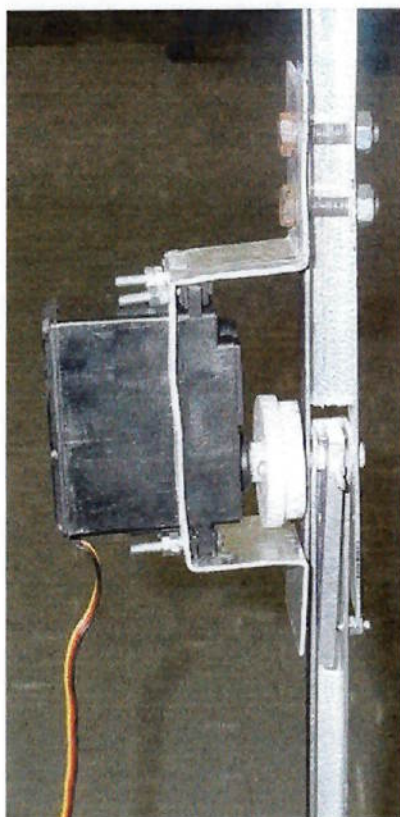


Foto 2 - Tornozelo





**Foto 3 - Joelho**



**Foto 4 - Tornozelo e joelho em diversas posições**



**Foto 5 - Membros do grupo presentes na apresentação da Mecânica**



**Foto 6 - Membros do grupo presentes na apresentação da Elétrica**

## APÊNDICE B

### Listagem do programa em MatLab que faz a análise estática do robô

```
clear all;

% Parâmetros de entrada
g = 9.81; % Aceleração da gravidade em m/s^2
Ms = 0.153; % Massa de cada servo em kg
Mi = 0.4; % Coeficiente de atrito entre o pé e o chão
(borracha e cimento)

% Parâmetros de homem normal
M = 40; % Massa de um homem em kg
H = 1.3; % Altura de um homem em m e altura de referência
para o robô

% Parâmetros utilizados para o robô
Mrobo = 20; % Massa do robô em kg

i = 1;

while Mrobo > 1.5
    % Ângulos de posicionamento para máxima torção no quadril
    (em radianos)
    alfa_l = 16.5*pi/180; % Coxa esquerda com a vertical
    (ângulo do quadril)
    alfa_r = -18.7*pi/180; % Coxa direita com a vertical (ângulo
    do quadril)
    beta_l = 5.3*pi/180; % Perna com a coxa esquerda (ângulo do
    joelho)
    beta_r = 13.9*pi/180; % Perna com a coxa direita (ângulo do
    joelho)
    gamma_l = -9.0*pi/180; % Calcanhar com a perna esquerda
    (ângulo do tornozelo)
    gamma_r = -16.3*pi/180; % Calcanhar com a perna direita
    (ângulo do tornozelo)

    % Parâmetros Calculados

    % Comprimentos de cada membro em m
    Lp = 0.191*H; % Pélvis
    Ltl = 0.245*H; % Coxa esquerda
    Ltr = 0.245*H; % Coxa direita
```

```
Lcl = 0.246*H; % Perna esquerda
Lcr = 0.246*H; % Perna direita
Lhl = 0.039*H; % Calcanhar esquerdo
Lhr = 0.039*H; % Calcanhar direito
Lfl = 0.152*H; % Pé esquerdo
Lfr = 0.152*H; % Pé direito
```

```
% Posições dos respectivos centros de gravidade em relação
à articulação superior
```

```
Gp = 0.5*Lp; % Pélvis
Gtl = 0.39*Ltl; % Coxa esquerda
Gtr = 0.39*Ltr; % Coxa direita
Gcl = 0.42*Lcl; % Perna esquerda
Gcr = 0.42*Lcr; % Perna direita
Gfl = 0.107*Lfl; % Pé + calcanhar esquerdo
Gfr = 0.107*Lfr; % Pé + calcanhar direito
```

```
% Massas dos membros do robô em kg (considerando a massa
dos servos)
```

```
Mtl = Mrobo*6.54/M; % Coxa esquerda
Mtr = Mrobo*6.54/M; % Coxa direita
Mcl = Mrobo*3.14/M; % Perna esquerda
Mcr = Mrobo*3.14/M; % Perna direita
Mfl = Mrobo*0.78/M; % Pé esquerdo
Mfr = Mrobo*0.78/M; % Pé direito
Mp = Mrobo-(Mtl+Mtr+Mcl+Mcr+Mfl+Mfr); % Pélvis
```

```
% Massas dos membros do robô em kg (eliminando a massa dos
servos)
```

```
mtl = Mtl-3*Ms; % Coxa esquerda
mtr = Mtr-3*Ms; % Coxa direita
mcl = Mcl-2*Ms; % Perna esquerda
mcr = Mcr-2*Ms; % Perna direita
```

```
% Ângulos dos membros do robô com a horizontal
```

```
tetal = alfa1+0.5*pi; % Coxa esquerda
tetar = alfa2+0.5*pi; % Coxa direita
fil = tetal-beta1; % Perna esquerda
fir = tetar-beta2; % Perna direita
psil = fil-gama1; % Calcanhar esquerdo
psir = fir-gama2; % Calcanhar direito
% Pesos dos membros do robô (incluindo os servos)
Pb = Mp*g; % Pélvis + membros superiores
Ptl = Mtl*g; % Coxa esquerda
Ptr = Mtr*g; % Coxa direita
```

```
Pcl = Mcl*g; % Perna esquerda
Pcr = Mcr*g; % Perna direita
Pfl = Mfl*g; % Pé esquerdo
Pfr = Mfr*g; % Pé direito
```

```
%Posições onde serão colocados os servos (em relação à
junta superior)
```

```
Lstl = (Mtl*Gtl-mtl*0.5*Ltl)/Ms; % Coxa esquerda
Lstr = (Mtr*Gtr-mtr*0.5*Ltr)/Ms; % Coxa direita
Lscl = (Mcl*Gcl-mcl*0.5*Lcl)/(2*Ms); % Perna esquerda
Lscr = (Mcr*Gcr-mcr*0.5*Lcr)/(2*Ms); % Perna direita
```

```
% Análise Estática do sistema para a posição de máxima
torção no quadril
```

```
% Matriz Principal - contém os coeficientes das incógnitas
```

```
A(1,1) = -1;
A(1,4) = 1;
A(2,2) = 1;
A(2,5) = -1;
A(3,3) = 1;
A(3,6) = -1;
A(4,1) = 1;
A(4,7) = -1;
A(5,2) = -1;
A(5,8) = 1;
A(6,3) = -1;
A(6,7) = (-1)*Ltl*sin(tetal);
A(6,8) = (-1)*Ltl*cos(tetal);
A(6,9) = 1;
A(7,4) = -1;
A(7,10) = 1;
A(8,5) = 1;
A(8,11) = -1;
A(9,6) = 1;
A(9,10) = Ltr*sin(tetar);
A(9,11) = Ltr*cos(tetar);
A(9,12) = -1;
A(10,7) = 1;
A(10,13) = -1;
A(11,8) = -1;
A(11,14) = 1;
A(12,9) = -1;
A(12,13) = (-1)*Lcl*sin(fil);
A(12,14) = (-1)*Lcl*cos(fil);
```

```

A(12,15) = 1;
A(13,10) = -1;
A(13,16) = 1;
A(14,11) = 1;
A(14,17) = -1;
A(15,12) = 1;
A(15,16) = Lcr*sin(fir);
A(15,17) = Lcr*cos(fir);
A(15,18) = -1;
A(16,13) = 1;
A(16,21) = -1;
A(17,14) = -1;
A(17,19) = 1;
A(18,15) = -1;
A(18,19) = (-1)*(Lhl*cos(psil)+0.333*Lfl*sin(psil));
A(18,21) = (-1)*(Lhl*sin(psil)-0.333*Lfl*cos(psil));
A(19,16) = -1;
A(19,22) = 1;
A(20,17) = 1;
A(20,20) = 1;
A(21,18) = 1;
A(21,20) = 0.667*Lfr*sin(psir)-Lhr*cos(psir);
A(21,22) = 0.667*Lfr*cos(psir)+Lhr*sin(psir);
A(22,19) = (-1)*Mi;
A(22,21) = 1;
A(23,20) = (-1)*Mi;
A(23,22) = 1;

```

```

% Matriz coluna que contém os termos independentes

```

```

B(1,1) = 0;
B(2,1) = Pb;
B(3,1) = 0;
B(4,1) = 0;
B(5,1) = Ptl;
B(6,1) = (-1)*Ptl*Gtl*cos(tetal);
B(7,1) = 0;
B(8,1) = Ptr;
B(9,1) = (-1)*Ptr*Gtr*cos(tetar);
B(10,1) = 0;
B(11,1) = Pcl;
B(12,1) = (-1)*Pcl*Gcl*cos(fil);
B(13,1) = 0;
B(14,1) = Pcr;
B(15,1) = (-1)*Pcr*Gcr*cos(fir);
B(16,1) = 0;

```

```

B(17,1) = Pfl;
B(18,1) = Pfl*(-Lhl*cos(psil)+0.107*Lfl*sin(psil));
B(19,1) = 0;
B(20,1) = Pfr;
B(21,1) = Pfr*(Lhr*cos(psir)-0.107*Lfr*sin(psir));
B(22,1) = 0;
B(23,1) = 0;

```

```

% Cálculo do vetor que contém as soluções do sistema linear

```

```

X = pinv(A)*B;
Fxhl = X(1,1);
Fyhl = X(2,1);
Thl = X(3,1);
Fxhr = X(4,1);
Fyhr = X(5,1);
Thr = X(6,1);
Fxkl = X(7,1);
Fykl = X(8,1);
Tkl = X(9,1);
Fxkr = X(10,1);
Fykr = X(11,1);
Tkr = X(12,1);
Fxal = X(13,1);
Fyal = X(14,1);
Tal = X(15,1);
Fxar = X(16,1);
Fyar = X(17,1);
Tar = X(18,1);
Nl = X(19,1);
Nr = X(20,1);
Atl = X(21,1);
Atr = X(22,1);

```

```

% Segundo caso: desconsiderando 1 equação de atrito

```

```

% Matriz Principal - contém os coeficientes das incógnitas

```

```

C(1,1) = -1;
C(1,4) = 1;
C(2,2) = 1;
C(2,5) = -1;
C(3,3) = 1;
C(3,6) = -1;
C(4,1) = 1;
C(4,7) = -1;
C(5,2) = -1;

```

```

C(5,8) = 1;
C(6,3) = -1;
C(6,7) = (-1)*Ltl*sin(tetal);
C(6,8) = (-1)*Ltl*cos(tetal);
C(6,9) = 1;
C(7,4) = -1;
C(7,10) = 1;
C(8,5) = 1;
C(8,11) = -1;
C(9,6) = 1;
C(9,10) = Ltr*sin(tetar);
C(9,11) = Ltr*cos(tetar);
C(9,12) = -1;
C(10,7) = 1;
C(10,13) = -1;
C(11,8) = -1;
C(11,14) = 1;
C(12,9) = -1;
C(12,13) = (-1)*Lcl*sin(fil);
C(12,14) = (-1)*Lcl*cos(fil);
C(12,15) = 1;
C(13,10) = -1;
C(13,16) = 1;
C(14,11) = 1;
C(14,17) = -1;
C(15,12) = 1;
C(15,16) = Lcr*sin(fir);
C(15,17) = Lcr*cos(fir);
C(15,18) = -1;
C(16,13) = 1;
C(16,21) = -1;
C(17,14) = -1;
C(17,19) = 1;
C(18,15) = -1;
C(18,19) = (-1)*(Lhl*cos(psil)+0.333*Lfl*sin(psil));
C(18,21) = (-1)*(Lhl*sin(psil)-0.333*Lfl*cos(psil));
C(19,16) = -1;
C(19,22) = 1;
C(20,17) = 1;
C(20,20) = 1;
C(21,18) = 1;
C(21,20) = 0.667*Lfr*sin(psir)-Lhr*cos(psir);
C(21,22) = 0.667*Lfr*cos(psir)+Lhr*sin(psir);
C(22,19) = (-1)*Mi;
C(22,21) = 1;

```

```
% Matriz coluna que contém os termos independentes
```

```
D(1,1) = 0;  
D(2,1) = Pb;  
D(3,1) = 0;  
D(4,1) = 0;  
D(5,1) = Ptl;  
D(6,1) = (-1)*Ptl*Gtl*cos(tetal);  
D(7,1) = 0;  
D(8,1) = Ptr;  
D(9,1) = (-1)*Ptr*Gtr*cos(tetar);  
D(10,1) = 0;  
D(11,1) = Pcl;  
D(12,1) = (-1)*Pcl*Gcl*cos(fil);  
D(13,1) = 0;  
D(14,1) = Pcr;  
D(15,1) = (-1)*Pcr*Gcr*cos(fir);  
D(16,1) = 0;  
D(17,1) = Pfl;  
D(18,1) = Pfl*(-Lhl*cos(psil)+0.107*Lfl*sin(psil));  
D(19,1) = 0;  
D(20,1) = Pfr;  
D(21,1) = Pfr*(Lhr*cos(psir)-0.107*Lfr*sin(psir));  
D(22,1) = 0;
```

```
% Cálculo do vetor que contém as soluções do sistema linear
```

```
X2 = inv(C)*D;  
Fxhl2 = X2(1,1);  
Fyhl2 = X2(2,1);  
Thl2 = X2(3,1);  
Fxhr2 = X2(4,1);  
Fyhr2 = X2(5,1);  
Thr2 = X2(6,1);  
Fxkl2 = X2(7,1);  
Fykl2 = X2(8,1);  
Tkl2 = X2(9,1);  
Fxkr2 = X2(10,1);  
Fykr2 = X2(11,1);  
Tkr2 = X2(12,1);  
Fxa12 = X2(13,1);  
Fya12 = X2(14,1);  
Ta12 = X2(15,1);  
Fxa2 = X2(16,1);  
Fya2 = X2(17,1);  
Ta2 = X2(18,1);
```

```

N12 = X2(19,1);
Nr2 = X2(20,1);
Atl2 = X2(21,1);
Atr2 = X2(22,1);

Y1(i,1) = -Th1;
Y2(i,1) = -Thr;
Y3(i,1) = -Th12;
Y4(i,1) = -Thr2;

Massa(i,1) = Mrobo;
Mrobo = Mrobo - 0.5;
i = i+1;
end

plot(Massa,Y1,'b',Massa,Y2,'g',Massa,Y3,'c',Massa,Y4,'r-
. ');
xlabel('Massa do robô (kg)');
ylabel('Momento na junta do quadril (N x m)');
legend('Th1 (1o. método)', 'Thr(1o. método)', 'Th1(2o.
método)', 'Thr (2o. método)');
grid on;

```