

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação
ISSN 0103-2569

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ARQUITETURA MECÂNICA PARA
O TIME DE FUTEBOL DE ROBÔS USPDroids – VERSÃO 2009**

**MARCOS VINÍCIUS FERNANDES RIBEIRO
MARCELO OLIVEIRA DA SILVA
ROSELI APARECIDA FRANCELIN ROMERO**

Nº 358

RELATÓRIOS TÉCNICOS



**São Carlos – SP
Jul./2010**

SYSNO	<u>1839281</u>
DATA	<u>1</u> / <u>1</u>
ICMC - SBAB	

**Desenvolvimento de uma Arquitetura
Mecânica para o Time de Futebol de Robôs
USPDroids - versão 2009**

Marcos Vinícius Fernandes Ribeiro
ribeiro.mvf@gmail.com

Marcelo Oliveira da Silva
msilva@icmc.usp.br

Roseli Aparecida Francelin Romero
rafrance@icmc.usp.br

Resumo

Este projeto de pesquisa teve como objetivo o desenvolvimento de uma arquitetura para um time de futebol de robôs da categoria "Very Small Size". Será apresentado neste documento todo o processo de desenvolvimento desta arquitetura, fazendo uma breve análise das áreas envolvidas e apresentando as motivações para a realização deste trabalho. Além disso, será apresentado o time de robôs do ICMC, USPDroids, no qual esta arquitetura foi aplicada. Será discutido o método utilizado no projeto e na produção de todos os componentes desenvolvidos, acompanhado de explicações detalhadas de cada componente. Ainda, serão apresentados outros usos aos quais esta arquitetura pode ser aplicada.

Conteúdo

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	ix
1 Introdução	1
1.1 Futebol de Robôs	1
1.2 USPDroids	4
1.3 Organização	4
2 A categoria IEEE Very Small Size	7
2.1 Robôs	7
2.2 VII CBR	9
3 Descrição do Trabalho	11
4 Sistemas de Transmissão	13
4.1 Norma do Dente	13
4.2 Tipos de Engrenagem	14
4.2.1 Engrenagem Cilíndrica de Dentes Retos	14
4.2.2 Engrenagem Cilíndrica de Dentes Helicoidais	14
4.2.3 Engrenagem Cônica	15
4.2.4 Engrenagem Hipóide	15
4.2.5 Engrenagem Rosca Sem Fim	16
4.2.6 Sistemas Planetários	17
4.3 Nomenclaturas e definições	17
4.4 Posicionamento	18
4.5 Engrenagens internas e externas	19
5 Metodologia e considerações de projeto	21
5.1 O Robô	22
5.1.1 Motores Faulhaber 2224 006SR	22
5.1.2 Motores Action Motors PM080-SS05	25

5.1.3	Roda e Caixa de Redução	25
5.1.4	Carcaça Externa e Organização Interna	27
5.2	Processos de Fabricação	29
5.3	Análise Estrutural do Robô	31
6	Desenhos	35
7	Considerações Finais	57
7.1	Trabalhos Futuros	58
7.2	Agradecimentos	58
	Referências	59

Lista de Figuras

1.1	Visão geral dos módulos e suas relações de fluxo de informação .	5
1.2	Campo oficial das competições IEEE Very Small Size e time USP-Droids/2009	5
4.1	Montagem com Engrenagens Retas (Nice, 2010)	14
4.2	Montagem com Engrenagens Helicoidais a 90° (Nice, 2010)	15
4.3	Montagem de parte de um diferencial, utilizando engrenagens cônicas de dentes retos (Nice, 2010)	16
4.4	Montagem de uma engrenagem hipóide com outra helicoidal (Ashoka Group, 2010)	16
4.5	Montagem de uma engrenagem rosca sem fim com uma engrenagem reta (Nice, 2010)	17
4.6	Montagem explicativa de um sistema de redução planetário (Yao, 2008)	18
4.7	Engrenamento de duas engrenagens de dentes retos (Gordo e Ferreira, 2000)	19
4.8	Engrenamento de duas engrenagens de dentes retos (Gordo e Ferreira, 2000)	19
5.1	Comparativo entre rampas de aceleração de algumas rodas testadas	27
5.2	Vista explodida do robô	28
5.3	Cruva da variação temporal da tensão aplicada	31
5.4	Curva da deformação gerada pela tensão aplicada	32
5.5	Detalhe da fratura durante o ensaio de compressão no corpo de prova 1	32
6.1	Base do Motor - Desenho Técnico	36
6.2	Base do Motor - Renderizado 3D	37
6.3	Base do Motor - Modelo Real	37

6.4 Base do Robô - Desenho Técnico	38
6.5 Base do robô - Renderizado 3D	39
6.6 Base do robo - Modelo Real	39
6.7 Roda - Desenho Técnico	40
6.8 Roda - Renderizado 3D	41
6.9 Roda - Modelo Real	42
6.10 Eixo da Roda - Desenho Técnico	43
6.11 Eixo da Roda - Renderizado 3D	44
6.12 Eixo da Roda - Modelo Real	44
6.13 Eletrônica - Desenho Técnico	45
6.14 Eletrônica - Modelo Real	46
6.15 Mecânica Interna - Desenho Técnico	47
6.16 Mecânica Interna - Renderizado 3D	48
6.17 Mecânica Interna - Modelo Real	48
6.18 Suporte da Bateria - Desenho Técnico	49
6.19 Suporte da Bateria - Renderizado 3D	50
6.20 Suporte da Bateria - Modelo Real	51
6.21 Tampa - Desenho Técnico	52
6.22 Tampa - Renderizado 3D	53
6.23 Tampa - Modelo Real	53
6.24 Modelo Completo - Desenho Técnico	54
6.25 Modelo Completo- Renderizado 3D	55
6.26 Modelo Completo - Modelo Real	56

Lista de Tabelas

5.1	Dados de desempenho de algumas rodas testadas	27
-----	---	----

1. The first part of the book is devoted to the study of the properties of the function $f(x)$ which is defined by the equation

$$f(x) = \int_0^x \frac{1}{1+t^2} dt$$

It is shown that the function $f(x)$ is increasing and concave down, and that it has a horizontal asymptote at $y = \frac{\pi}{2}$. The second part of the book is devoted to the study of the properties of the function $g(x)$ which is defined by the equation

$$g(x) = \int_0^x \frac{1}{1+t^4} dt$$

Introdução

A robótica é um dos campos de pesquisa que tem alcançado grandes desenvolvimentos nos últimos anos. Inicialmente, os robôs foram utilizados para a automação de processos de produção industrial. Esses robôs por executarem tarefas bem definidas e repetitivas não necessitavam lidar com situações imprevistas. Então, era possível programar todas as possíveis ações do agente robótico para que ele as executem de forma satisfatória.

Porém, com o desenvolvimento tecnológico, os robôs começaram também ser utilizados para outros propósitos tais como: entretenimento (jogos, brinquedos), medicina (cirurgia), e realização de tarefas em ambientes perigosos ou de difícil acesso a humanos (espaciais, subaquáticos). Nesse contexto, surgiram os robôs móveis autônomos com a proposta de realizar uma variedade de tarefas mais complexas que seus antecessores, os robôs industriais.

A principal limitação na utilização de robôs móveis está em como controlá-los, ou seja, como criar programas capazes de operar estas máquinas complexas. A complexidade cresce, ainda mais, quando considera-se, não apenas um robô, mas uma equipe de robôs para realizar uma tarefa. Para tanto, são necessárias técnicas que lhes permitam interagir de forma efetiva com o ambiente. A parte essencial desta interação é o módulo de planejamento de caminhos que cada robô utiliza para decidir suas ações e encontrar seu caminho em um ambiente.

1.1 Futebol de Robôs

Em (Mackworth, 1993) sugeriu que o ambiente de futebol de robôs fosse adequado para se avaliar o desempenho de técnicas de robótica móvel autô-

noma e áreas próximas, como por exemplo: Visão Computacional, Inteligência Artificial, Controle, Eletrônica, Mecânica. (Silva et al., 2009; Costa e Pegoraro, 2000; Kitano et al., 1995, 1997)

Através da adoção deste problema padrão -futebol de robôs- pode ser feita a avaliação de várias teorias, algoritmos, desempenhos e arquiteturas, para os quais uma grande variedade de tecnologias possam ser integradas e analisadas. Uma das vantagens oferecidas pela adoção de um problema padrão é que a avaliação do progresso de uma pesquisa pode ser claramente definida e acompanhada.

O domínio de futebol de robôs é dinâmico e imprevisível, resultando num domínio bastante complexo, que exige o uso de sistemas com alto grau de autonomia, atuando em *malha fechada*¹ e em tempo real. Diversos tópicos específicos de pesquisa são oferecidos por este domínio, incluindo, entre outros:

- Completa integração entre percepção, ação e cognição num time de múltiplos agentes robóticos;
- Definição de um conjunto de comportamentos reativos robustos para cada agente, isto é, cada agente deve ser capaz de realizar tanto ações individuais quanto colaborativas;
- Percepção em tempo real, robusta e confiável, incluindo rastreamento de múltiplos objetos em movimento.

Para desenvolver um time de robôs móveis² autônomos³ capazes de disputar partidas de futebol robótico, é necessário uma abordagem multidisciplinar, combinando conhecimento de diversas áreas, como mecânica, eletrônica, controle, visão computacional, fusão de sensores em tempo real, comportamento reativo, aprendizado, planejamento em tempo real, sistemas multi-agentes, decisão estratégica e outras.

Desde o trabalho de (Mackworth, 1993), quando o ambiente de futebol de robôs foi apresentado como um *benchmark* para a robótica, diversos pesquisadores tem utilizado este ambiente como teste para suas pesquisas em robótica (Thomas e Stonier, 2002; Augusto Silva Pereira et al., 2004). Alguns anos depois, a FIRA⁴ e a RoboCup⁵ surgiram como duas iniciativas de pesquisadores coreanos e japoneses, respectivamente, para prover competições mundiais de robótica.

Em 95, foi fundado um comite organizado internacional no *Korea Advanced Institute for Science and Technology* (KAIST) para tratar do “*Micro-Robot World*

¹o ambiente fornece feedback dos atos do agente robótico

²capazes de se deslocar pelo ambiente

³durante sua operação, não existe um operador humano controlando o robô

⁴www.fira.net

⁵www.robocup.org

Cup Soccer Tournament" (MiroSot). Em 96, em um encontro de verão, foi realizada uma prévia da MiroSot, entre os dias 29 de julho e 4 de agosto, contando com a participação de 30 equipes de 13 países. A primeira MiroSot viria a ser realizada no mesmo ano, entre os dias 9 e 12 de Novembro, que contou com a participação de 23 times de 10 países. O time *Newton*, do Newton Research Laboratories (sediado em Seattle, EUA), e o time *SOTY*, do KAIST, foram campeão e vice-campeão mundial, respectivamente. Inicialmente, a FIRA focava apenas no MiroSot. Atualmente, ela conta com várias categorias, algumas são simuladas, isto é, simuladores de robôs são utilizados.

Paralelamente, em 93 foi iniciado um projeto intitulado *Robot J-League*⁶, objetivando a criação de uma competição de robótica. Entretanto, diversos pesquisadores de várias partes do mundo, requisitaram que a iniciativa fosse estendida para um projeto internacional. Desta forma, o projeto foi rebatizado como *Robo World Cup Initiative* (RoboCup). Durante o *Joint International Conference on Artificial Intelligence* (IJCAI-95), realizada em Montreal, Canadá, em agosto de 1995, foi divulgado que a primeira RoboCup ocorreria em conjunto com o IJCAI-97, em Nagoya. Ao mesmo tempo, foi decidido organizar a *Pré-RoboCup-96*, a fim de identificar potenciais problemas associados com a organização da RoboCup em larga escala. A pré-RoboCup-96 foi realizada durante a *International Conference on Intelligent Robots and Systems* (IROS-96), Osaka, de 4 a 8 de novembro de 1996, contando com com oito equipes. Embora em escala limitada, esta é a primeira competição de jogos de futebol de robôs. Os primeiros jogos oficiais da RoboCup foram realizados em 1997 com grande sucesso, onde participaram mais de 40 equipes. Em (Kitano et al., 1995, 1997), pode ser visto mais detalhes históricos desta iniciativa.

Ambas competições fornecem uma tarefa padrão para a pesquisa em robótica móvel autônoma em tempo real, no qual os agentes necessitam colaborar para resolver problemas dinâmicos. O objetivo final delas é que em futuro próximo seja possível partidas de futebol entre robôs e humanos. Como diz (Kitano et al., 1997), problemas-padrão em Inteligência Artificial (IA) são a força motriz da pesquisa em IA. Um destes problemas-padrão mais conhecidos é o xadrez.

Ainda em (Kitano et al., 1997), o futebol de robôs é apresentado como um ambiente multiagente. Durante um jogo, existem dois times competindo, com o objetivo de vencer o adversário. O time oponente pode ser visto como obstáculo dinâmico do ambiente, que irão atrapalhar a realização da meta. Para atingir a meta (ganhar o jogo), cada time necessita marcar gols, que pode ser visto como uma sub-meta. Para atingir esta meta, cada agente precisa ser rápido e ter um comportamento flexível e cooperativo, levando em conta si-

⁶ *J-League* é o nome da liga profissional de futebol japonês

tuações globais e locais. Um time também pode ser visto como esquema de planejamento cooperativo e distribuído em tempo real.

No futebol de robôs cada categoria possui a sua particularidade, seja nas dimensões do robô, no número de rodas e motores, e até no tipo de robô (por exemplo, holonômico ou não-holonômico). Especificamente neste trabalho, serão analisadas as necessidades da Equipe USPDroids, dentro da categoria "Very Small Size".

1.2 USPDroids

O USPDroids é um time de futebol de robôs desenvolvido por alunos de graduação e pós-graduação, do Laboratório de Aprendizado de Robótica, LAR, do ICMC/USP, no Campus de São Carlos. O grupo foi formado em 2005, planejando participar da categoria de Futebol de Robôs "IEEE Very Small Size", embora já se estude participar de outras categorias, como a "Robocup Small Size", mais conhecido como F-180, e competições de simulação computacional, como a "Robocup Simulation 2D".

Já tendo participado de algumas competições, obteve as seguintes classificações:

- QUARTO LUGAR, na *Competição Brasileira de Robótica*, em Florianópolis/2007 (Penharbel et al., 2007);
- TERCEIRO LUGAR, na *Latin American Robots Competition* (Silva et al., 2008), em Salvador/2008;
- VICE-CAMPEÃO, na *Competição Brasileira de Robótica* (Silva et al., 2009), em Brasília/2009.

Abaixo, segue alguns detalhes do sistema integrado utilizado no futebol de robôs. Como pode ser visto em (Silva et al., 2009), o time (Figura 1.2) é composto por quatro módulos (Figura 1.1):

- **Visão** Módulo responsável pela localização dos robôs e classificação entre robôs *aliados* e robôs *inimigos*;
- **Estratégia** Módulo responsável pelas decisões (autônomas), do sistema.
- **Eletrônica** Módulo responsável pelo tratamento das informações recebidas via rádio, e controle dos motores.
- **Mecânica** Módulo que constitui a parte física do robô (carcaça, rodas, engrenagens e etc).

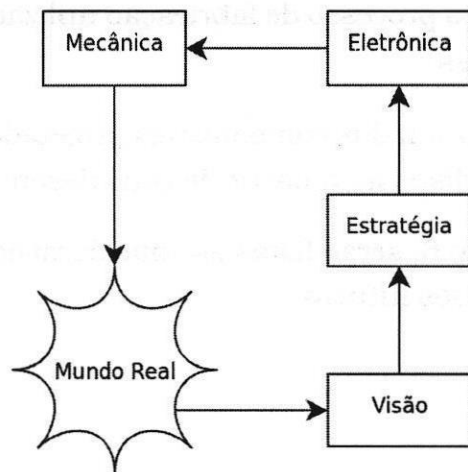


Figura 1.1: Visão geral dos módulos e suas relações de fluxo de informação



Figura 1.2: Campo oficial das competições IEEE Very Small Size e time USP-Droids/2009

1.3 Organização

Este documento se constrói na sequência seguinte:

- No Capítulo 2 é apresentada a categoria IEEE “Very Small Size”, na qual este projeto foi aplicado.
- No Capítulo 3 o trabalho realizado é descrito.
- No Capítulo 4, a metodologia utilizada durante o projeto é descrita, bem como as considerações realizadas, descrevendo-se peça por peça. Tam-

bém é apresentado o processo de fabricação utilizado e ensaios realizados com os componentes.

- No Capítulo 5, cada um dos componentes projetados, separados em seus grandes grupos, é disposto a partir de seus desenhos.
- Por fim, no Capítulo 6, serão feitas as considerações finais e uma análise de possíveis trabalhos futuros.

A categoria IEEE Very Small Size

A categoria IEEE Very Small Size é a única categoria em nível nacional que permite o uso de micro-robôs móveis. Ela é equivalente a MiroSot, sendo diferente em dois aspectos principais: tamanho do campo e quantidade de robôs por time. A categoria IEEE Very Small Size utiliza 3 robôs e um campo de $1,5m \times 1,3m$, enquanto que a MiroSot tem duas categorias, uma com 5 robôs, na qual é utilizada um campo com $2,2m \times 1,8m$ e outra categoria com 11 robôs, na qual é utilizada um campo com $4m \times 2,8m$.

Abaixo segue parte das regras desta categoria, traduzidas não oficialmente por um membro do USPDroids, e publicado no sítio da CBR.

2.1 Robôs

O tamanho de cada robô deverá ser limitado a $75mm \times 75mm \times 75mm$. A altura da antena de radiofrequência não deverá ser considerada neste limite.

A parte superior dos robôs não deverá conter as cores laranja, branco ou cinza e também não deverá conter mais de duas cores diferentes da cor preta.

A cor que irá identificar times distintos, a ser definido pelos organizadores, poderá ser azul ou amarelo.

Todos os robôs deverão possuir uma região visível na parte superior.

Uma etiqueta (azul ou amarela, definida pelos organizadores), irá identificar os robôs de cada time. A parte superior dos robôs deverá ter uma etiqueta do time, seja ela na cor azul ou amarela. A etiqueta pode ser de qualquer forma, mas deve ser capaz de conter (pelo menos) um quadrado com 35mm de lado ou um círculo com 40mm de diâmetro. A cor de identificação de cada time poderá mudar de partida a partida, portanto a etiqueta usada deverá ser destacável.

Quando os times estiverem com as etiquetas com as cores (azul ou amarelo) definidas, os robôs não devem ter, na parte superior, nenhuma região com a cor do time adversário.

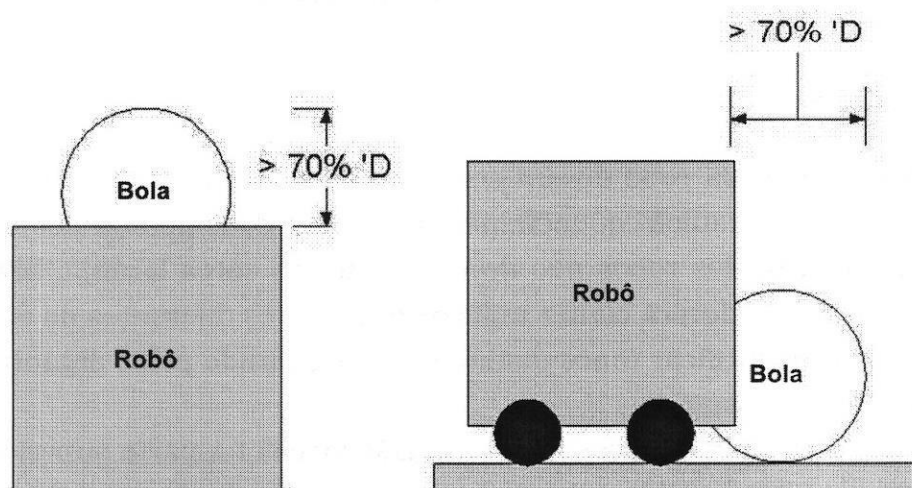
Observação: É recomendado que os times preparem, no mínimo, 2 etiquetas azuis e 2 etiquetas amarelas. É recomendado, também, que os times preparem no mínimo 6 etiquetas diferentes além da azul e amarela, para identificação individual de cada robô.

Os robôs podem vestir uniformes, que deverão ser limitado a $80mm \times 80mm \times 80mm$.

Um robô dentro da área do próprio gol deverá ser considerado como "goleiro". O papel de goleiro poderá ser trocado, dinamicamente, durante a disputa; assim um robô dentro de sua própria área sempre será considerado como o goleiro. Ao robô goleiro será permitido pegar ou segurar a bola, somente dentro da área do próprio gol.

Cada robô dever ser totalmente independente, com baterias e motores contidos em si mesmo. Somente comunicação sem fio deverá ser permitida para todos os tipos de interações entre o computador "host" e um robô.

Os robôs podem ser equipados com braços, pernas, etc., mas devem respeitar as limitações de tamanho, mesmo depois dos equipamentos estarem totalmente expandidos. Nenhum dos robôs, exceto o designado como goleiro, serão permitidos pegar ou segurar a bola como um goleiro de forma a encobrir mais do que 30% da bola, em vista superior ou lateral (Figura 2.1).



Enquanto uma partida estiver em progresso, no momento em que o árbitro apitar, o operador humano deverá parar todos os robôs usando a comunicação entre os robôs e o computador "host".

2.2 VII CBR

Entre 20 e 23 de setembro de 2009, a Sociedade Brasileira de Automática (SBA) realizou três eventos em conjunto, sendo que a equipe USPDroids participou de um deles, a VII Competição Brasileira de Robótica (CBR).

Na edição de 2009 do CBR participaram ao todo 38 equipes, de 23 instituições diferentes, de todo o país, distribuídas em 9 categorias diferentes.

A equipe USPDroids participou da categoria "IEEE Very Small Size, e nesta mesma categoria participaram outras quatro equipes:

- Equipe Poti - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN);
- Equipe Carrossel Caipirinha - Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" (UNESP - Bauru);
- Equipe UFES__HARD__SOCCER - Universidade Federal do Espírito Santo (UFES);
- Equipe ROBO-SE - Universidade Federal do Sergipe (UFS).

A competição ocorreu em duas fases, na primeira todas as equipes se enfrentaram, e na segunda, as quatro melhores fizeram a semi-final, a final e a disputa pelo terceiro lugar. Na primeira fase classificaram-se:

1ºColocado Equipe USPDroids - 12 pontos;

2ºColocado Equipe Poti - 9 pontos;

3ºColocado Equipe Carrossel Caipirinha - 9 pontos;

4ºColocado Equipe ROBO-SE - 1 ponto.

Assim foi realizado a fase final, e a classificação final foi:

1ºColocado Equipe Poti;

2ºColocado Equipe USPDroids;

3ºColocado Equipe Carrossel Caipirinha.

Descrição do Trabalho

Este trabalho foi realizado entre fevereiro e dezembro de 2009, e tinha como objetivo desenvolver o sistema mecânico do time USPDroids, pertencente à categoria IEEE "Very Small Size". Um robô pertencente a esta categoria, normalmente, possui:

- 2 motores DC;
- 2 rodas;
- 2 caixas de redução;
- 1 conjunto de baterias;
- 1 placa de circuito impresso;
- Carcaça;
- Marca de identificação.

A exceção das baterias, circuito impresso e dos motores, o restante cabe ao desenvolvimento da mecânica.

Devido às limitações impostas pela norma IEEE, a disposição das partes, definida durante o projeto mecânico do robô, impõe grandioso desafio. Assim, dispor corretamente as peças dentro da carcaça, minimizando os espaços inutilizados, faz com que o projeto se torne bastante complexo.

Além disso, o projeto mecânico é dependente de outras áreas, como eletrônica, controle e simulação. Controle e simulação necessitam de um modelo do robô para fazer suas análises, e a definição do formato e de detalhes mecânicos se fazem importantes para estes.

A definição das dimensões da placa de circuito eletrônico e das dimensões e capacidades das baterias é dada pelo projeto eletrônico, e como estes componentes são físicos, ou seja, ocuparão espaço dentro do robô, a disposição destes também faz parte do projeto mecânico.

Ainda, a escolha do motor deve ser feita conjuntamente entre todas estas áreas, pois é de igual importância para todas, pois:

- A tensão de entrada do motor deve ser menor, ou próxima da tensão da bateria, para evitar o uso de componentes que ampliam a tensão, pois, usualmente, são componentes grandes;
- A potência do motor deve ser verificada, bem como seu consumo e eficiência, pois estes fatores irão definir a capacidade das baterias. Baterias de maior capacidade são maiores que baterias de menor capacidade, ocupando então mais espaço;
- Para que se faça o modelo numérico, as características do motor devem ser combinadas com as da caixa de redução e o resultado final deve ser analisado para ver se as velocidades atingidas são suportadas, devido às limitações de aquisição da câmera e do sistema de controle.

Torna-se então imprescindível a interação entre todas as áreas do grupo para o bom andamento do projeto e para um resultado final satisfatório.

Sistemas de Transmissão

Tradicionalmente, existem duas formas de se transmitir movimentos rotativos, através de correias e de engrenagens. Sistemas de correias e polias normalmente são utilizados em sistemas simples, nos quais o sentido de rotação não será alterado. Engrenagens são utilizadas em sistemas mais complexos ou em sistemas que se deseja inverter o sentido de rotação final. Principalmente, a utilização de engrenagens evita o escorregamento, que pode ocorrer em sistemas de correias e polias.

Quando se utiliza engrenagens, alguns pontos devem ser discutidos, pois são fundamentais para a utilização de engrenagens.

4.1 Norma do Dente

Existem diversas organizações de padronização nos mais diversos países, e existem ainda outras que são consideradas internacionais. Dentre as mais conhecidas e utilizadas podemos citar a ISO (International Organization for Standardization), ANSI (American National Standards Institute) e DIN (Deutsches Institut für Normung, ou, em inglês, German Institute for Standardization).

Cada norma possui peculiaridades próprias, apesar de possuírem formatos parecidos para os dentes. Dentre as peculiaridades, podemos citar a espessura da camada de proteção, o passo da engrenagem em função do número de dentes e a quantidade mínima de dentes permitidos para aquela norma. Todos esses valores são gerais, independentes do tamanho e da forma da engrenagem.

4.2 Tipos de Engrenagem

Existem diversos tipos de engrenagens, que possuem formatos e usos diferentes (Stipkovic Filho, 2001). Ainda para o mesmo uso, possuem vantagens e desvantagens, que devem ser levadas em conta no processo de escolha.

4.2.1 Engrenagem Cilíndrica de Dentes Retos

O tipo mais comum de engrenagens é a engrenagem cilíndrica de dentes retos¹ (Figura 4.1), e pode ser usada sempre que se deseja transmitir movimento em um único plano, sem mudança no sentido de rotação. A grande vantagem deste tipo de engrenagem é a sua simplicidade, tanto no processo de fabricação quanto em relação aos critérios de projeto.

Uma das grandes desvantagens deste formato de engrenagem é permitir folgas maiores que outros formatos, além de possuir uma menor área de contato, aumentando então o esforço estrutural.

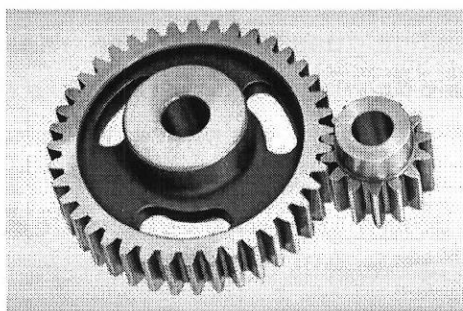


Figura 4.1: Montagem com Engrenagens Retas (Nice, 2010)

4.2.2 Engrenagem Cilíndrica de Dentes Helicoidais

Engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais² (Figura 4.2) são uma opção para transmissão quando se deseja emitir menos ruído, obter maior precisão, e trabalhar em velocidades e tensões mais altas. A grande vantagem deste tipo de engrenagem é que apenas uma pequena região de uma engrenagem toca a outra engrenagem, e esta região desliza do início ao fim do dente, diminuindo o ruído e o esforço estrutural, pois não há esforço repentino.

Outra vantagem é que estas engrenagens podem trabalhar sem alterar a direção de rotação, ou alterando esta, e neste caso, os eixos de rotação não formam um plano entre si, pois formam retas reversas. A desvantagem de se utilizar esta configuração é gerar uma componente de força axial, necessitando então de uma compensação no eixo ou no rolamento. Outra forma de

¹spur gear

²helical gear

corrigir este problema é utilizar engrenagens helicoidais duplas ³⁴, que possuindo duas faces espelhadas entre si, faz com que as componentes axiais se anulem. Entretanto esta configuração traz grandes dificuldades de fabricação, pois cada engrenagem deve ser fabricada separadamente, e depois unidas. O sentido de rotação também influenciará na montagem, pois em um sentido as forças axiais tentarão unir o conjunto e no outro tentarão separá-lo, assim esta montagem não é recomendada para sistemas que trabalham com reversão de sentido.

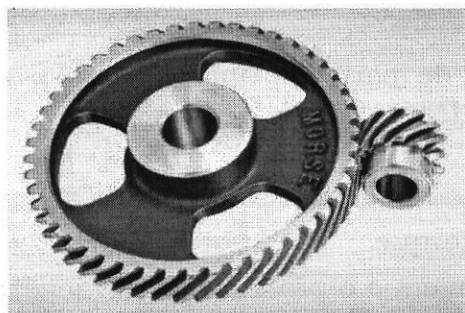


Figura 4.2: Montagem com Engrenagens Helicoidais a 90° (Nice, 2010)

4.2.3 Engrenagem Cônica

A engrenagem cônica (Figura 4.3) é outro tipo bastante comum de engrenagem, pois é utilizado quando se deseja alterar a direção do eixo de rotação. Apesar de um pouco mais complexa, esta engrenagem também possui processo de fabricação bastante simplificado. Uma desvantagem deste tipo de engrenagem é permitir apenas mudanças de direção com ambos os eixos no mesmo plano.

As engrenagens cônicas podem possuir dentes retos⁵ ou dentes helicoidais⁶.

4.2.4 Engrenagem Hipóide

A engrenagem hipóide⁷ (Figura 4.4) é uma engrenagem cônica na qual os eixos estão em planos paralelos. Apesar de parecer uma engrenagem cônica de dentes helicoidais, na realidade os dentes tem forma de hiperbolóides, para compensar o deslocamento do eixo.

Uma grande vantagem deste sistema é que o pinhão do conjunto pode ser construído com poucos dentes, permitindo então valores de redução na ordem

³double helical

⁴ou herringbone gear

⁵bevel gear

⁶spiral bevel gear

⁷hypoid gear

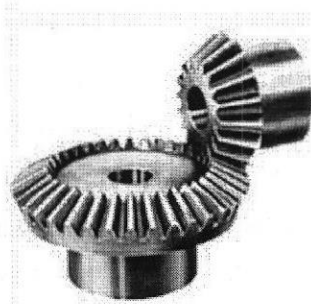


Figura 4.3: Montagem de parte de um diferencial, utilizando engrenagens cônicas de dentes retos (Nice, 2010)

de 60:1 em uma única montagem, e por isso este sistema é bastante utilizado em diferenciais de alto torque.

Sua grande desvantagem é o processo de fabricação, que é bastante complexo. Obter o perfil da curva do dente é tarefa para maquinário bastante preciso e, conseqüentemente, caro.

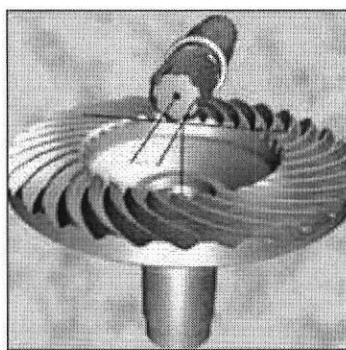


Figura 4.4: Montagem de uma engrenagem hipóide com outra helicoidal (Ashoka Group, 2010)

4.2.5 Engrenagem Rosca Sem Fim

Engrenagens rosca sem fim⁸ (Figura 4.5), ou fusos, são um modelo particular de engrenagens helicoidais, mas com ângulo de hélice bastante elevado, próximo dos 90°, o que faz com que um mesmo dente dê mais de uma volta no eixo da engrenagem, parecendo então um fuso.

A grande vantagem deste sistema é se conseguir altas taxas de redução com apenas um acoplamento. Enquanto um sistema de engrenagens normal está limitado, usualmente, a redução de 10:1, sistemas com fusos podem atingir reduções da ordem de 100:1 em uma ligação direta.

⁸worm gear

Outro detalhe, que pode ser uma desvantagem ou uma vantagem, é que este sistema possui apenas um sentido: quando o fuso move o conjunto. Caso ocorra o contrário, o conjunto pode ou não funcionar. Quando o conjunto não funciona, temos um conjunto auto-travante, e esse fato pode ser utilizado como característica de projeto.

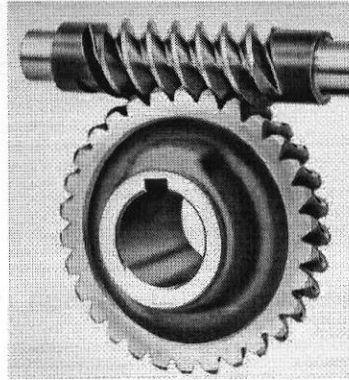


Figura 4.5: Montagem de uma engrenagem rosca sem fim com uma engrenagem reta (Nice, 2010)

4.2.6 Sistemas Planetários

Para resolver a limitação de redução direta entre engrenagens retas e helicoidais, pode-se utilizar uma montagem conhecida como redução planetária⁹ (Figura 4.6). Nesta, uma engrenagem menor, definida por engrenagem solar¹⁰, move um conjunto de engrenagens, chamadas engrenagens planetárias¹¹, e estas movem uma engrenagem interna a um anel¹² que transmitirá o movimento final.

Outra característica desta montagem é a possibilidade de se modificar a engrenagem de entrada e saída, modificando a relação de redução e até alterando o sentido de rotação. Ainda, sistemas planetários são simples de serem alinhados, podendo gerar taxas de redução bastante elevadas.

4.3 Nomenclaturas e definições

Existem em uma engrenagem diversas nomenclaturas que são fundamentais para o cálculo e o posicionamento de um sistema de redução, dentre estes podemos citar (Stipkovic Filho, 2001):

Número de dentes (Z) quantidade de dentes que a engrenagem possui;

⁹epicyclic ou planetary gear

¹⁰sun gear

¹¹planet gears

¹²annulus ou ring gear

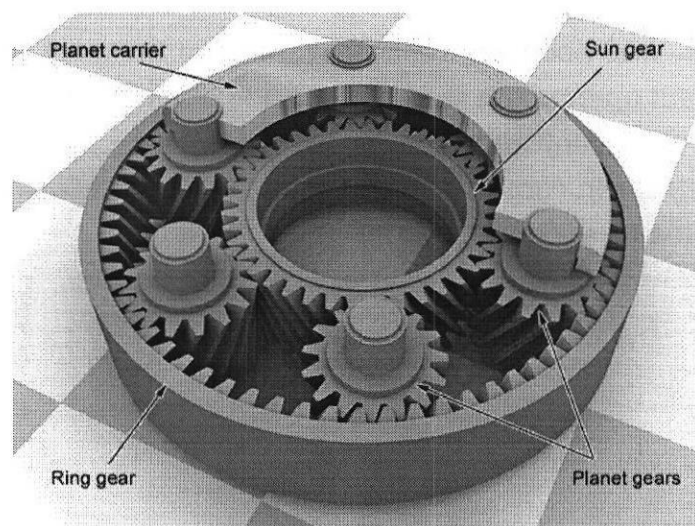


Figura 4.6: Montagem explicativa de um sistema de redução planetário (Yao, 2008)

Coroa engrenagem maior de um par;

Pinhão engrenagem menor de um par;

Eixo linha de revolução da engrenagem;

Diâmetro nominal ou primitivo (D_p) o dobro da distância entre o centro da engrenagem até a linha de contato;

Módulo (m) altura da cabeça do dente;

Passo (p) distância angular entre um dente e outro;

Redução (N) relação entre as velocidades angulares do pinhão e da coroa.

Dado estas, algumas relações são verdadeiras:

$$D_p = m \times Z$$

e

$$N = \frac{Z_1}{Z_2}$$

4.4 Posicionamento

O posicionamento de duas engrenagens, para que se obtenha maior eficiência e para que o encaixe dos dentes seja suave, deve obedecer a uma única regra: a linha de ação, determinada pelo diâmetro primitivo, de ambas as engrenagens devem se tocar (Figura 4.7)(Figura 4.8). Será neste ponto que as engrenagens se encontrarão e transmitirão torque e movimento.

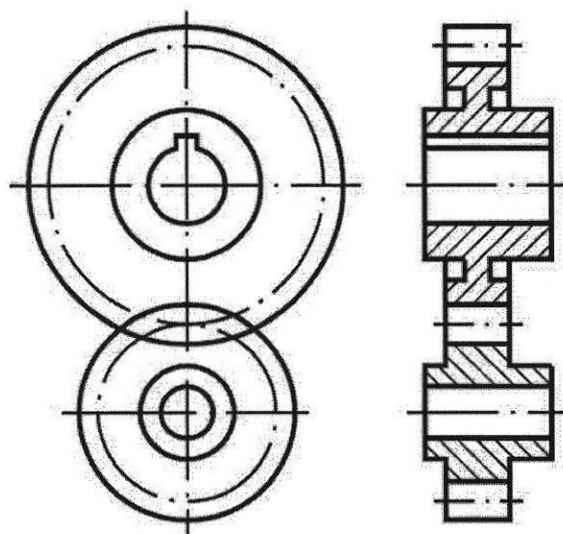


Figura 4.7: Engrenamento de duas engrenagens de dentes retos (Gordo e Ferreira, 2000)

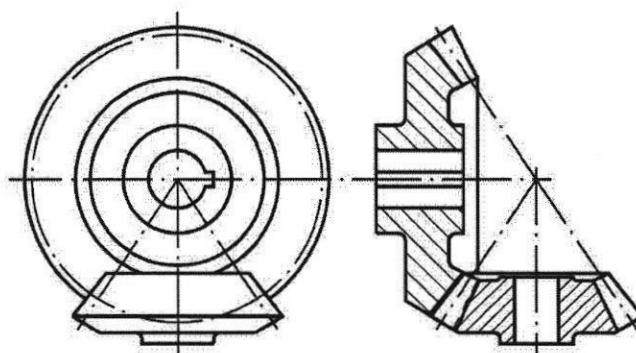


Figura 4.8: Engrenamento de duas engrenagens de dentes retos (Gordo e Ferreira, 2000)

4.5 Engrenagens internas e externas

Engrenagens internas trazem consigo uma vantagem dimensional sobre engrenagens externas, pois permitem maiores relações de redução em comprimentos menores. Em compensação, exigem diâmetros maiores.

Quanto à eficiência, desgaste ou durabilidade, as duas são bastante semelhantes, sendo que irá influenciar muito mais o tipo de engrenagem escolhida que o fato de ser interna ou externa.

1. The first part of the paper discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that proper record-keeping is essential for the transparency and accountability of any organization.

2. The second part of the paper focuses on the various methods used to collect and analyze data. It highlights the need for a systematic approach to data collection and the importance of using reliable sources.

3. The third part of the paper discusses the challenges faced by researchers in the field of data analysis. It identifies common pitfalls and offers strategies to overcome them.

4. The fourth part of the paper presents a case study of a successful data analysis project. It details the steps taken from data collection to final results, providing a practical example for others to follow.

5. The fifth part of the paper discusses the future of data analysis. It explores emerging technologies and their potential impact on the field.

6. The sixth part of the paper discusses the ethical considerations of data analysis. It emphasizes the need for researchers to be transparent about their methods and to protect the privacy of their subjects.

7. The seventh part of the paper discusses the importance of collaboration in data analysis. It highlights the benefits of working with others and offers tips for effective collaboration.

8. The eighth part of the paper discusses the role of data analysis in decision-making. It emphasizes that data should be used to inform decisions rather than to make decisions for them.

9. The ninth part of the paper discusses the importance of communication in data analysis. It emphasizes that researchers must be able to clearly and effectively communicate their findings to their audience.

10. The tenth part of the paper discusses the importance of staying up-to-date in the field of data analysis. It emphasizes that researchers must continuously learn and adapt to new developments.

Metodologia e considerações de projeto

O projeto do sistema mecânico do time de futebol de robôs deve, além de obedecer a todas as normas da competição (IEEE, 2008), ainda servir como uma plataforma de testes em robótica móvel. Para tanto, os mesmos robôs utilizados em uma partida de futebol deveriam, com simples e pequenas mudanças, servir como micro robôs móveis de propósito geral.

Objetivando isto, foi escolhida uma metodologia de organização em módulos. Cada parte do robô está dividida em um módulo. Cada módulo é independente dos outros e pode ser facilmente removido. Quando o uso fosse diverso do futebol de robôs, o módulo superior seria removido e em seu lugar seria colocado outro módulo que conteria o que fosse necessário para os ensaios a serem realizados. Assim, para se chegar ao último módulo do robô, seria necessário remover todos os módulos superiores a ele, mas todos estes módulos estariam apenas encaixados, sem nenhum parafuso ou outro método de fixação, tornando sua remoção rápida e simples.

Os únicos módulos fixos são o último, referente ao motor e as rodas, que necessita ser fixo para evitar movimentos verticais, e o primeiro, referente a tampa, para manter o robô fechado em qualquer situação de jogo.

Escolhida a metodologia de projeto, faz-se necessária uma consideração inicial, que será justificada mais a frente: Todos os esforços estruturais no robô são desprezíveis, porém vibrações no sistema devem ser tratadas e instabilidades dos componentes devem ser analisadas.

5.1 O Robô

O robô é composto de uma caixa quadrada, com externo de 75mm, porém mais baixa que o limite, na qual estariam todos os componentes do robô. Fora desta caixa estaria apenas parte da eletrônica, protegida então por uma tampa.

Assim, o robô mantém a configuração padrão geral, apresentada na descrição do trabalho, e tenta-se inovar na disposição dos componentes. Assim, devem ser projetados os seguintes componentes:

- Carcaça externa com área para carregar a bola;
- Carcaça interna para suportar os motores;
- Suporte interno para se apoiar as baterias;
- Tampa;
- Roda e respectivos eixos;
- Caixa de redução.

5.1.1 Motores Faulhaber 2224 006SR

A escolha dos motores é de fundamental importância, pois a partir dela se conhece todas as características de desempenho do robô, tais como velocidades máximas e acelerações máximas, curvas de torque e potência.

Essa escolha deve vir em conjunto com o projeto do sistema de redução, pois ele deve ser projetado para adequar a rotação da roda à do motor.

Inicialmente a escolha ficou entre utilizar motores Maxon ou Faulhaber, duas empresas conhecidas no ambiente de robótica por fabricarem motores pequenos e confiáveis. Optou-se pelos motores Faulhaber devido à sua melhor relação potência por volume. Os motores da Faulhaber são mais curtos, o que para uma limitação de espaço físico faz toda a diferença.

O desempenho dos motores foi calculado utilizando um método desenvolvido na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro- PUC/RJ(Meggiolaro, 2009). O método, apresentado em documento oficial do grupo, propõe relações simples entre os coeficientes do motor e o desempenho do robô.

Um detalhe interessante e inerente ao método, é que como a PUC-RJ participa de outra categoria, o combate de robôs, eles têm uma preocupação com o escorregamento da roda, que é importante para se saber qual a aceleração máxima que o controle pode enviar ao robô para que ele não deslize ou, no caso deles, quanto tempo o robô irá demorar para começar a deslocar-se.

Como o sistema de controle irá trabalhar utilizando uma rampa de aceleração, não haverá escorregamento inicial, mas pode haver devido a uma aceleração muito alta, e por isso nos é importante conhecer este valor, pois se deve colocar um limitante no sistema de controle. O cálculo do desempenho do robô para estes motores é o que segue abaixo.

$$W_{roda} = \frac{m \cdot g}{2}$$

$$F_{tracao} = \mu \cdot W_{roda}$$

$$\tau_{escorregamento} = F_{tracao} \cdot r$$

$$\tau_{maximo} = \frac{\tau_{escorregamento}}{n}$$

$$I_{escorregamento} = \frac{\tau_{maximo}}{K_t}$$

$$V_{maxima_{teorica}} = \frac{\omega_{noload}}{n} \cdot \frac{r}{1000}$$

$$\omega_1 = K_v \cdot (V_{maxima} - R_{sistema} \cdot I_{escorregamento})$$

$$V_1 = \frac{\omega_1}{n} \cdot \frac{r}{1000}$$

$$a_1 = \mu \cdot g$$

$$\Delta t_1 = \frac{V_1}{a_1}$$

$$I_{input} = \frac{V_{input}}{R_{sistema}} - \frac{\omega}{K_v \cdot R_{sistema}}$$

$$\tau_{motor} = K_T \cdot (I_{input} - I_{noload})$$

$$\tau_{roda} = \tau_{motor} \cdot n$$

$$F_{tratora} = \frac{\tau_{roda}}{r \cdot 1000}$$

$$a_2 = \frac{2 \cdot n}{m \cdot r} \cdot K_T \cdot \left(I_{stall} - I_{noload} - \frac{\omega}{K_v \cdot R_{sistema}} \right)$$

$$a_2 = \frac{2 \cdot n}{m \cdot r} \cdot K_T \cdot \left(I_{stall} - I_{noload} - \frac{\frac{V \cdot n}{r \cdot 1000}}{K_v \cdot R_{sistema}} \right)$$

$$\Delta t_2 = \int_{V_1}^{0.95 \cdot V_{maxima_{teorica}} \frac{1}{a_2}} dv$$

Sendo:

a_1 Aceleração da roda quando cessa o deslizamento - $[m/s^2]$;

a_2 Aceleração do robô - $[m/s^2]$;

F_{tracao} A força de tração em cada roda do robô - $[N]$ (Embora, a rigor, a força tratora é calculada através da força normal, elas são iguais nos casos desta aplicação);

$F_{tratora}$ Força tratora na roda para o torque gerado - $[mN]$;

g Aceleração da gravidade - $[m/s^2]$;

$I_{escorregamento}$ Corrente aplicada enquanto a roda está escorregando - $[A]$;

I_{input} Corrente a ser aplicada ao motor para as condições desejadas - $[A]$;

I_{noload} Corrente para rotação do motor sem carga no eixo - $[A]$;

I_{stall} Corrente para o torque máximo do motor - $[A]$;

K_T Constante de torque do motor - $[mN \cdot m/A]$;

K_v Constante de velocidade do motor - $[rad/s/V]$;

m Massa do robô - $[kg]$;

n Relação de redução entre a coroa e o pinhão - [adimensional];

r Raio da roda - $[mm]$;

$R_{sistema}$ Resistência total do sistema motor + baterias + eletrônica - $[ohms]$;

V Velocidade do robô - $[m/s]$;

V_{input} Tensão aplicada ao motor no instante medido - $[V]$;

V_{maxima} Tensão máxima aplicada ao motor - $[V]$;

$V_{maxima\text{teorica}}$ Velocidade máxima que o robô pode, em teoria, atingir - $[m/s]$ (Normalmente, esta velocidade é atingida após muito tempo, então não costuma ser considerada; as condições do campo interferem no quanto desta velocidade pode ser atingido, influenciando no coeficiente de atrito);

V_1 Velocidade da roda quando cessa o deslizamento - $[m/s]$;

W_{roda} A distribuição de peso em cada roda - $[N]$;

Δ_1 Tempo total até cessar o deslizamento - $[s]$;

Δ_2 Tempo total até 95% da velocidade máxima - $[s]$;

$\mu(= 0.9)$ Coeficiente de atrito com o solo - [adimensional];

$\tau_{escorregamento}$ Torque na roda a partir do qual a roda não mais escorrega - $[mN \cdot m]$;

τ_{maximo} Torque no motor a partir do qual a roda não mais escorrega - $[mN \cdot m]$;

τ_{motor} Toque no motor para a corrente aplicada - $[mN \cdot m]$;

τ_{roda} Torque na roda para o torque gerado no motor - $[mN \cdot m]$;

ω Rotação do motor no instante medido - $[rad/s]$;

ω_{noload} Rotação do motor sem carga no eixo - $[rad/s]$;

ω_1 Rotação do motor quando ele deixa de deslizar - $[rad/s]$.

5.1.2 Motores Action Motors PM080-SS05

Outra opção ainda são os motores da Action Motors, que apesar de serem bastante inferiores aos motores Maxon e Faulhaber, são significativamente mais baratos.

O uso destes motores é interessante para a fabricação de diversos robôs, pois o custo de um motor deste é cerca de 40 vezes menor que os motores Maxon ou Faulhaber.

Para o uso destes, entretanto, se faz necessário o desenvolvimento de sistemas de leitura de rotação do motor, para que se possa dar uma resposta em malha fechada para o sistema de controle.

5.1.3 Roda e Caixa de Redução

Quem definirá os movimentos do robô é a roda, sendo principal fator para a velocidade dele o seu diâmetro. Sendo a velocidade linear da roda o produto de sua circunferência pela velocidade angular, e o torque o produto do raio pela

força exercida no solo, então a roda deve ser definida em combinação com a caixa de redução, pois esta irá influenciar o torque e a rotação que sairão do motor, aumentando o primeiro e diminuindo o último.

Uma questão importante para o projeto da roda deve ser tratada antes: como será a transmissão engrenagem roda. Existem vários métodos, tais como prender ambos em um único eixo ou prender a roda na engrenagem.

Como um dos objetivos é a minimização do espaço utilizado, optou-se por uma configuração não convencional de transmissão, usualmente utilizada em engrenagens planetárias: a coroa formada por uma engrenagem interna ligada diretamente ao pinhão. Com a coroa interna à roda, pode-se utilizar a própria espessura da roda para acoplar a caixa de redução.

Enquanto a caixa de redução deveria ocupar no mínimo 6mm de espessura das engrenagens mais espaçamentos, mais 6mm de largura da roda, consegue-se com 9mm fazer a roda e a caixa de redução e ainda com uma vantagem: um valor de redução muito maior, pois a engrenagem da coroa pode ser significativamente maior que a engrenagem do pinhão.

Outra vantagem deste sistema é não possuir eixos girantes. Como o centro da roda não está ligado à uma engrenagem, o eixo da roda pode ser conectado à um rolamento, e esta à roda, possibilitando então que o eixo das rodas seja fixo, evitando assim problemas de fadiga.

A maior desvantagem deste sistema é que o diâmetro da roda passa a ser dependente do diâmetro da coroa, e o posicionamento do motor sofre o mesmo problema, pois se necessita fazer o encaixe exato entre coroa e pinhão para o bom funcionamento da caixa de redução. Como usualmente a roda é maior que a coroa este não é um problema grave, mas traz certo incômodo para reduções elevadas.

Vale lembrar que aumentar o diâmetro da roda possibilita uma maior relação de redução, diminuindo a velocidade final de rotação da roda, mas aumenta o seu comprimento linear. Como a relação entre eles é proporcional e direta, se houver o mesmo aumento percentual em ambas, a velocidade final não é alterada. Ainda, rodas com diâmetro alto ocupam mais espaço dentro do robô, mas possibilitam um maior espaçamento entre os motores.

Definidos os formatos da roda e da coroa, pode-se dimensionar ambas. Um fator importante para isso é a dimensão do pinhão, que virá junto aos motores Faulhaber, possuindo 12 dentes de módulo 0.3. Fazendo várias análises, variando-se as dimensões externas da roda e a redução do motor, pode-se construir o gráfico da Figura 5.1 e a Tabela 5.1

Foi escolhido utilizar a roda número 5, pois está é a que apresentou a menor velocidade máxima e menor tempo de escorregamento, embora como já dito, a rampa de aceleração será feita de forma que não haja escorregamento.

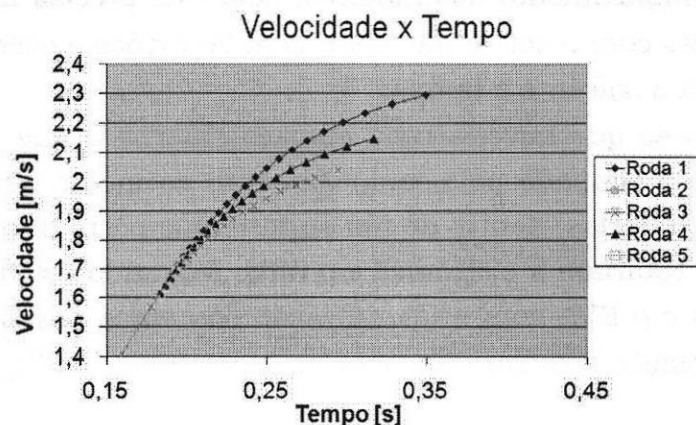


Figura 5.1: Comparativo entre rampas de aceleração de algumas rodas testadas

	Roda 1	Roda 2	Roda 3	Roda 4	Roda 5
Motor	FH 2224 006 SR				
Diâmetro [mm]	45	45	45	50	50
Redução	8	8.5	9	9.5	10
$T_{\text{escorregamento}}$ [s]	0.190	0.184	0.177	0.183	0.177
V_{maxima} [m/s]	2.29	2.16	2.04	2.15	2.04
$a_{\text{escorregamento}}$ [m/s ²]	8.83	8.83	8.83	8.83	8.83
$t_{V_{\text{maxima}}}$ [s]	0.350	0.350	0.294	0.317	0.294

Tabela 5.1: Dados de desempenho de algumas rodas testadas

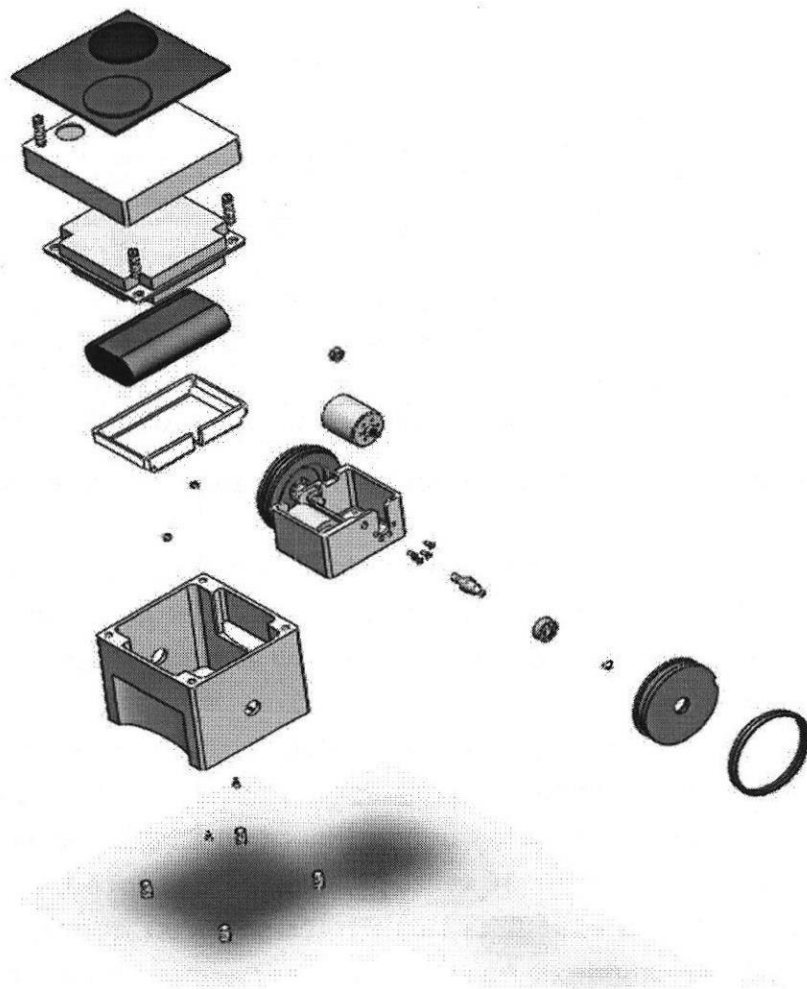
Note que as rodas 3 e 5 apresentam desempenhos idênticos, pois a roda 3 possui valores 10% menores que a roda 5, entretanto esta apresenta melhores características quando acoplada ao robô, devido a necessidade de posicionamento dos motores.

A roda é o maior problema do robô, e talvez o único, quando se trata de questões estruturais. Entretanto, possuindo o motor 4.55W, equivalentes a 0.006hp, e tendo capacidade de gerar não mais que $8.5mN \cdot m$, então mesmo após a ampliação do torque em 10 vezes pela caixa de redução, ele ainda seria muito pequeno. Uma análise feita nos dentes mostrou que para o caso do alumínio pouco seria exigido do material e não se haveria problemas de quebra de dentes em operação normal. A mesma análise repetida para plásticos, como o ABS e o Náilon, que possuem cerca de 50MPa de tensão de escoamento, mostra o mesmo resultado, pois seria necessário impor uma força de 127N para se romper cada dente, o que está muito além das capacidades do motor.

5.1.4 Carcaça Externa e Organização Interna

A grande vantagem de se utilizar um sistema modular com peças somente encaixadas é que se minimiza a quantidade de parafusos, agilizando a montagem e desmontagem do robô bem como sua manutenção. As exceções, como

Assim definiu-se que haveria uma carcaça externa e que o nível interno mais inferior seria ocupado pelo compartimento do motor, sendo logo sobre ele colocadas as baterias, dentro de um suporte que permitiria a troca rápida delas. Sobre ele estariam a eletrônica e o rádio fechando o robô. Acima deles apenas a tampa e o EVA com a identificação das cores dos times e de cada robô. Essa disposição fica clara na vista explodida do robô (Figura 5.2).



Em todo o conjunto existem 12 parafusos:

- 28

- 2 no compartimento do motor, para prendê-lo na carcaça externa;
- 4 na tampa, sendo que 3 deles servirão apenas de guia e um único estará rosqueado, para diminuir o tempo de troca das tampas e de abertura do robô.

O suporte das baterias possui o comprimento da carcaça interna, ficando então diretamente apoiado nesta, o que o mantém fixo, livre de qualquer impacto externo. Nele ainda existem dois rasgos na lateral, que permitem que os fios vindos dos motores sejam encaixados, ficando presos entre a parede do suporte e as baterias, evitando que se desgastem por contato com a roda.

A tampa foi projetada diretamente com as dimensões externas, ou seja, com laterais de 80mm. Isso fez com que se ganhasse uma área de quase 700mm^2 para a placa de eletrônica.

A tampa possui ainda um furo na sua parte superior, exatamente sobre o botão on/off do robô e dos pinos de recarga da bateria, permitindo que esta seja recarregada sem a necessidade de desmontar o robô.

5.2 *Processos de Fabricação*

Existem várias formas de se fabricar uma mesma peça, mas de uma forma bastante genérica e simplista pode-se dizer que existem basicamente duas formas: adicionando ou removendo material.

Remover material é ainda a forma mais utilizada, e na qual estão baseados a grande maioria dos processos convencionais de fabricação mecânica, como o torneamento, fresamento, furação, brochamento ou mandrilamento. Como alguns destes processos são utilizados pelo homem há séculos e vem sendo estudados desde que se tem estudado formas mais efetivas e precisas de se fabricar peças, estes processos são os mais desenvolvidos e mais precisos conhecidos hoje. Alguns processos de remoção de material chegam a utilizar feixes de nêutrons para remover elétron por elétron.

Entretanto, o material removido é desperdiçado, é descartado e, para alguns casos, a quantidade de material descartado é bastante superior a quantidade de material da peça final. Esse descarte elevado encarece demasiadamente o custo de fabricação de algumas peças, e é nesses casos em que entra outra forma de se fabricar peças, por adição de material.

Existem diversos métodos de se fabricar peças por adição de material e, hoje, apesar de ainda ser considerado um método não convencional de fabricação, já é uma ferramenta poderosíssima. Diversas são as vantagens e as desvantagens deste processo, mas dentre as principais podemos citar um descarte praticamente nulo de material e a possibilidade de se fabricar peças

complexas que jamais poderiam ser fabricadas por processos convencionais diretamente do modelo em CAD como sendo as maiores vantagens, e a limitação ainda grande de materiais e uma tolerância dimensional ainda grande como suas principais desvantagens (Gorni, 2001; Kruf et al., 2006; Ribeiro et al., 2010; Oliveira, 2008; Volpato, 2007).

No caso das peças fabricadas aqui, a quantidade de material removida seria em torno de duas vezes a quantidade de material restante, se utilizássemos processos convencionais. Ainda, algumas peças talvez nem fossem possíveis de ser fabricada, isso devido às pequenas dimensões utilizadas e à necessidade de utilizar formas variadas.

Assim optou-se por utilizar técnicas de adição de material, conhecidas como Prototipagem Rápida ou Impressão 3D. Dentre as tecnologias de impressão 3D pode-se citar a Estereolitografia(SLA), a Manufatura de Objetos com Lâminas(LOM), a Cura Sólida na Base(SGC), Impressão por Jato de Tinta(MJT ou BPM) e a Conformação Próxima ao Formato Final via Laser(LENS), mas precisamos citar especialmente o processo de Sinterização Seletiva à Laser(SLS) e o processo de Modelagem por Deposição de Material Fundido(FDM), pois são estes os processos que utilizamos na fabricação de nossas peças.

A técnica de Sinterização Seletiva à Laser, patenteada em 1989, usa um raio de laser para fundir, de forma seletiva, materiais pulverulentos, tais como náilon, elastômeros e metais, num objeto sólido. As peças são construídas sobre uma plataforma a qual está imediatamente abaixo da superfície de um recipiente preenchido com o pó fusível por calor. O raio laser traça a primeira camada, sinterizando o material. A plataforma é ligeiramente abaixada, reaplica-se o pó e o raio laser traça a segunda camada. O processo continua até que a peça esteja terminada. O pó em excesso ajuda a dar suporte ao componente durante sua construção.

Já na técnica de Modelagem por Deposição de Material Fundido, filamentos de resina termoplástica aquecida são extrudadas a partir de uma matriz em forma de ponta que se move num plano X-Y. Da mesma maneira que um confeitiro enfeita um bolo usando um saco de confeitaria, a matriz de extrusão controlada deposita filetes de material muito finos sobre a plataforma de construção, formando a primeira camada do componente. A plataforma é mantida sob uma temperatura inferior à do material, de forma que a resina termoplástica endurece rapidamente. Após esse endurecimento a plataforma se abaixa ligeiramente e a matriz de extrusão deposita uma segunda camada sobre a primeira. O processo é repetido até a construção total do protótipo. São construídos suportes durante a fabricação para segurar o protótipo durante sua fabricação. Tais suportes são fixados ao protótipo usando-se um segundo material, mais fraco, ou uma junção perfurada. As resinas termoplásticas

adequadas a esse processo incluem poliéster, polipropileno, ABS, elastômeros e cera usada no processo de fundição por cera perdida (USDD, 1975).

Tal processo é usualmente bastante dispendioso, e só foi possível de ser realizado devido ao apoio do Departamento de Tecnologia Tridimensional, DT3D, do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, CTI (antigo CenPRA), em Campinas. Nesse centro, eles possuem duas máquinas de SLS, uma máquina FDM e outras três máquinas de MJT.

Todas as peças do robô foram fabricadas através do processo SLS, à exceção da roda, que utilizou o processo FDM, por ser mais preciso.

5.3 Análise Estrutural do Robô

Como já foi dito, os robôs não apresentam necessidades estruturais, pois os esforços são mínimos. Ainda assim, realizamos três ensaios de compressão monotônica na caixa externa do robô para verificar seu comportamento e a força e as tensões necessárias para danificar o componente.

Assim, foram utilizadas três diferentes taxas de compressão, 1mm/min , 3mm/min e 5mm/min (Figuras 5.3 a 5.5). O objetivo de utilizar taxas diferentes era verificar se o comportamento de fratura seria o mesmo para compressões contínuas e longas e compressões rápidas.

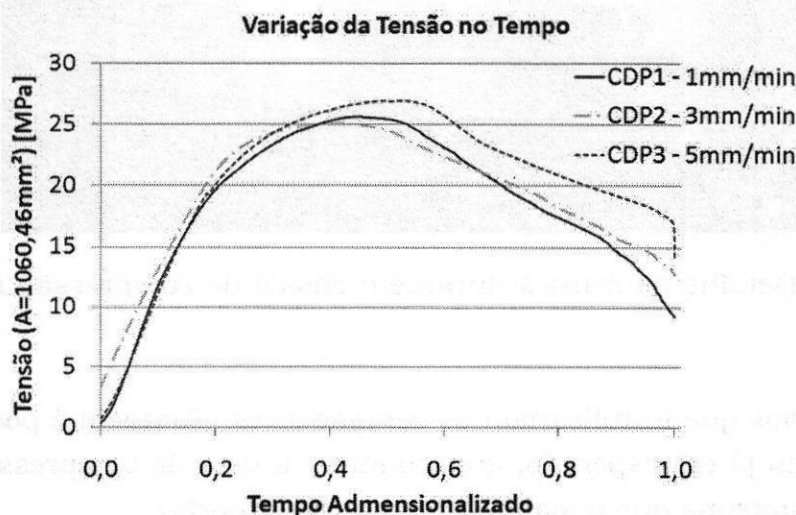


Figura 5.3: Cruva da variação temporal da tensão aplicada

Pode-se verificar da variação temporal da tensão que o comportamento de deformação da estrutura é semelhante, independente da taxa de compressão imposta.

Um detalhe que é possível de ser observado em ambos os gráficos é que somente o Corpo De Prova 3 sofreu de fato ruptura, embora os outros corpos

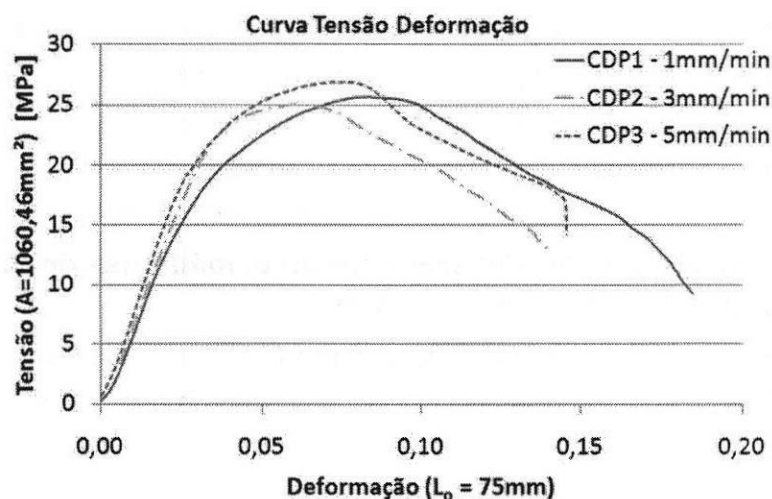


Figura 5.4: Curva da deformação gerada pela tensão aplicada

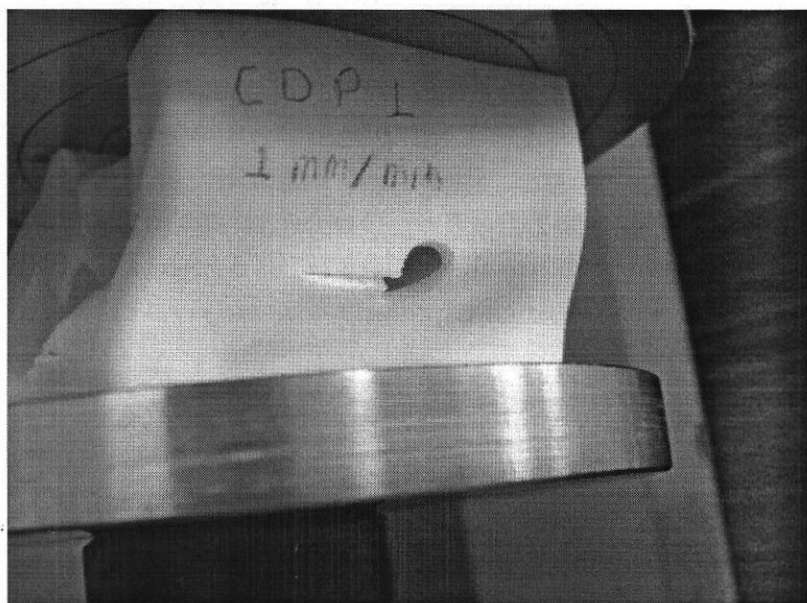


Figura 5.5: Detalhe da fratura durante o ensaio de compressão no corpo de prova 1

sofreram danos que inutilizariam os componentes. Também é possível verificar que, como já era esperado, quanto maior a taxa de compressão menor a deformação máxima que o material é capaz de suportar.

Dos gráficos podemos estimar o valor da tensão de escoamento do material, que está próxima de 20MPa , e de seu Módulo de Elasticidade, aproximadamente $0,6\text{GPa}$. Este valor é bastante inferior ao valor de tabela do Náilon, realizado sob a norma ASTM638 (Náilon 6/6 com 50% de umidade e 25°C) (ASTM, 2009), que apresenta valores de tensão de escoamento de $58,6\text{MPa}$ e Módulo de Elasticidade da ordem de $1,2\text{GPa}$, e embora haja diversas razões para isto, uma em especial deve ser levantada: Conforme o pó dedicado ao

processo de sinterização é reutilizado, este perde em propriedades mecânicas, deixando o material menos resistente e o processo menos preciso.

Foi de nossa opção utilizar um pó já bastante reutilizado, podendo assim analisar a robustez do processo e a resistência dele a folgas, e tornando o processo de fabricação menos dispendioso, pois este pó reutilizado é mais barato que o pó novo.

Independente desta análise, para que uma força de $15MPa$ possa ser aplicada sobre o robô se faz necessário cerca de $1500kg$, ou seja, uma força fora do uso normal deste componente, e portanto, mais uma vez, a consideração comum inicial se faz válida.

Desenhos

Para facilitar a compreensão dos desenhos foram omitidos os arredondamentos de quinas e cantos vivos dos desenhos técnicos, mas estes aparecem nas vistas isométricas.

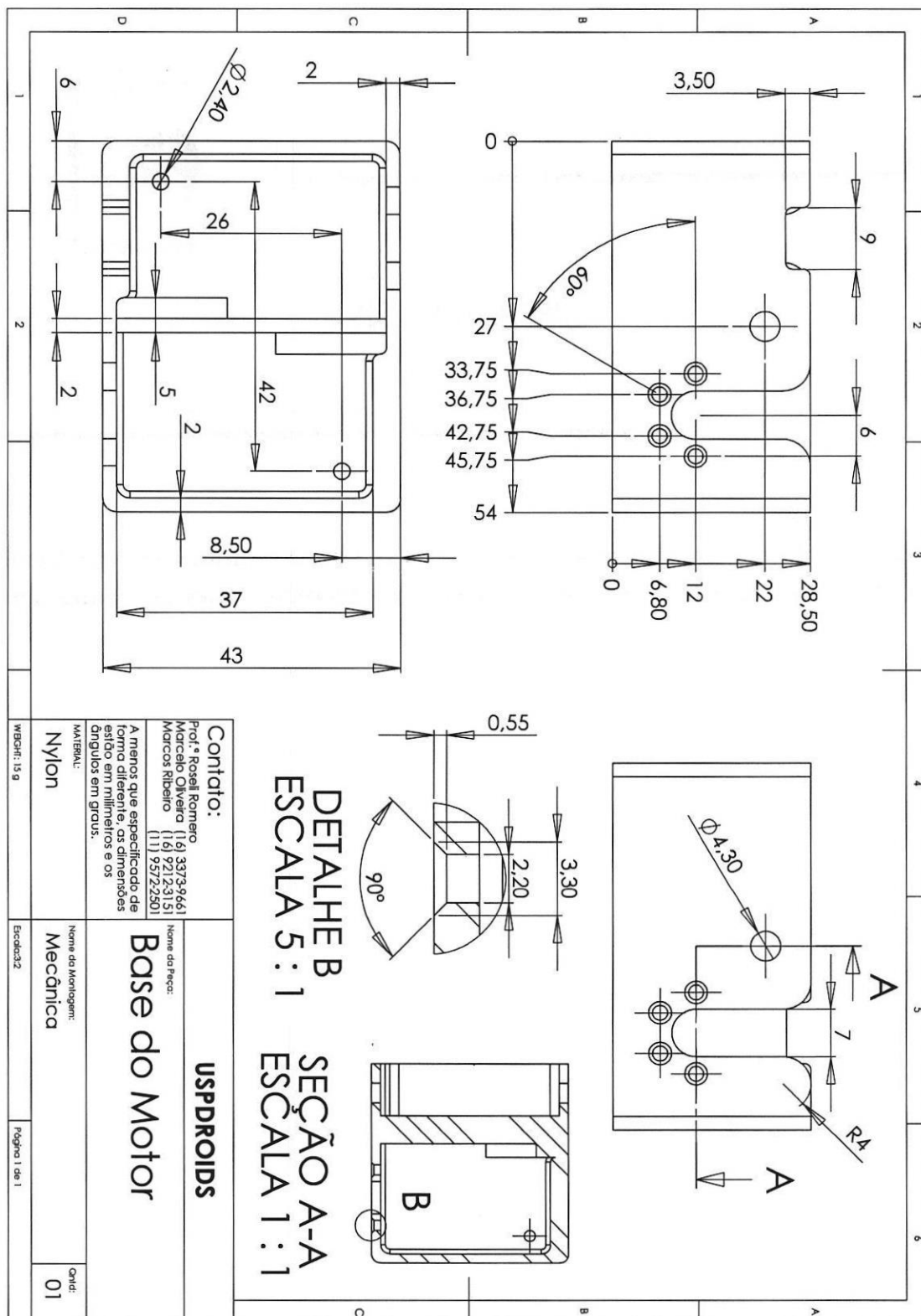


Figura 6.1: Base do Motor - Desenho Técnico

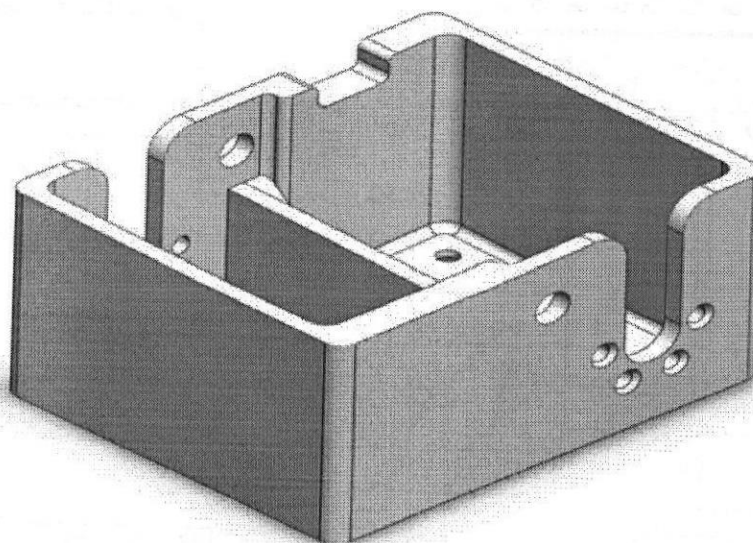


Figura 6.2: Base do Motor - Renderizado 3D

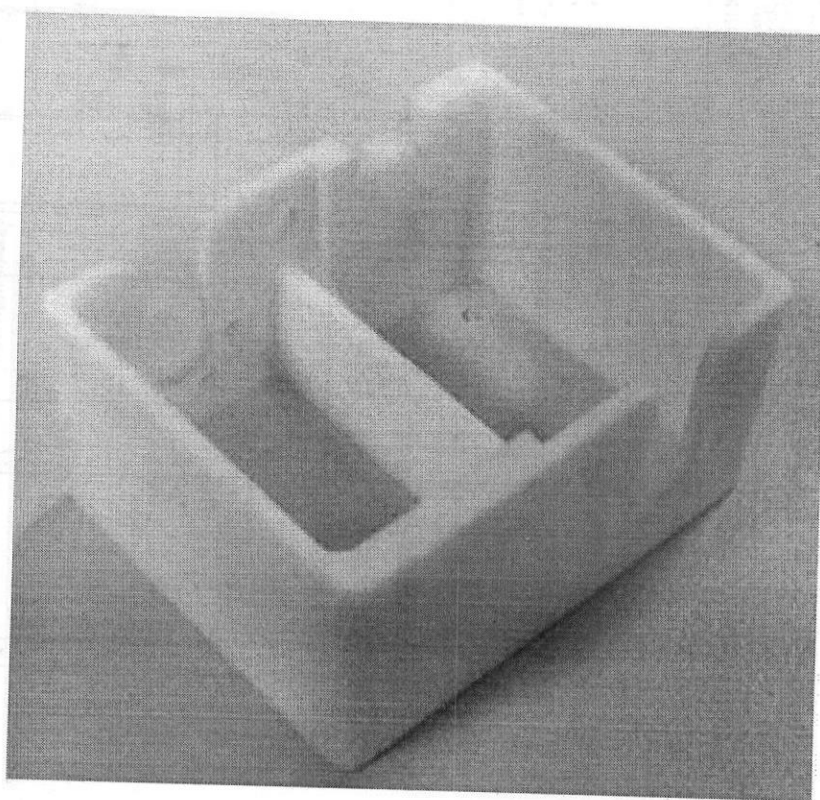


Figura 6.3: Base do Motor - Modelo Real

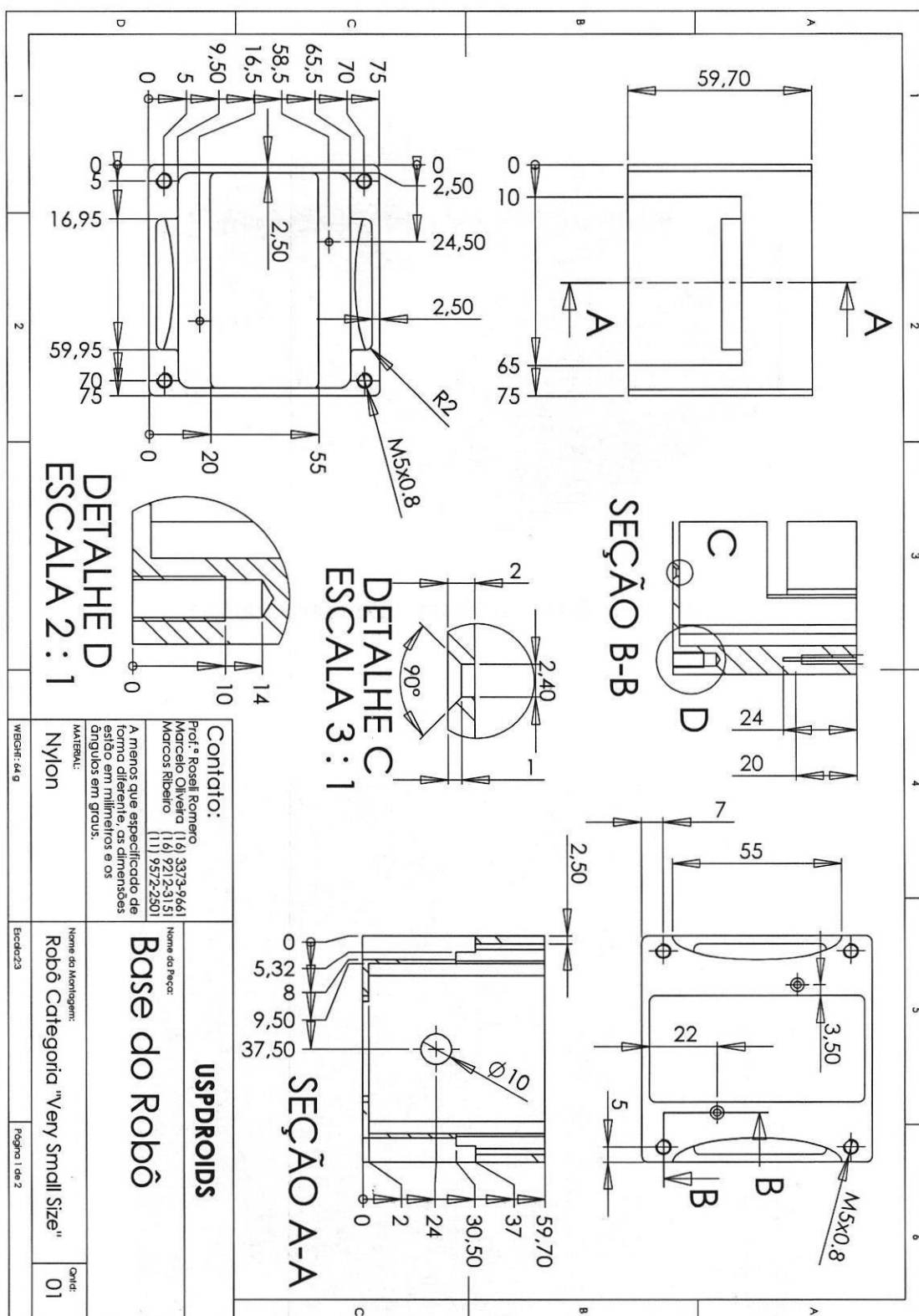


Figura 6.4: Base do Robô - Desenho Técnico

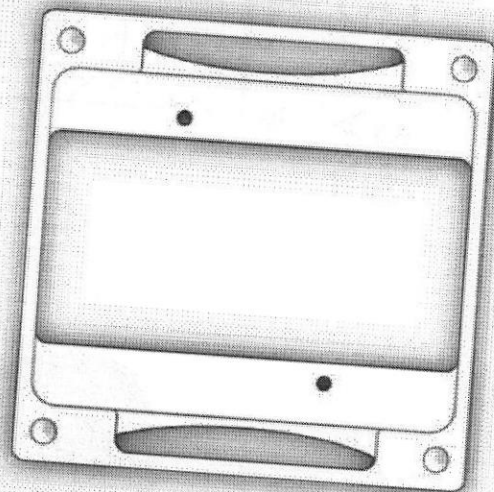
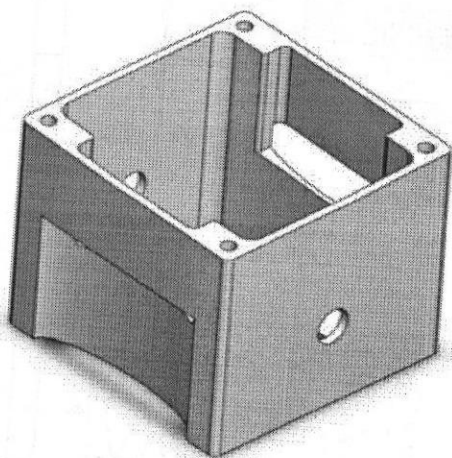


Figura 6.5: Base do robô - Renderizado 3D

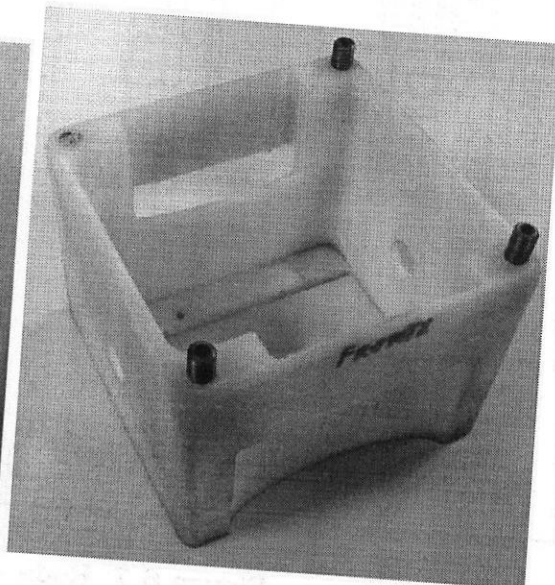
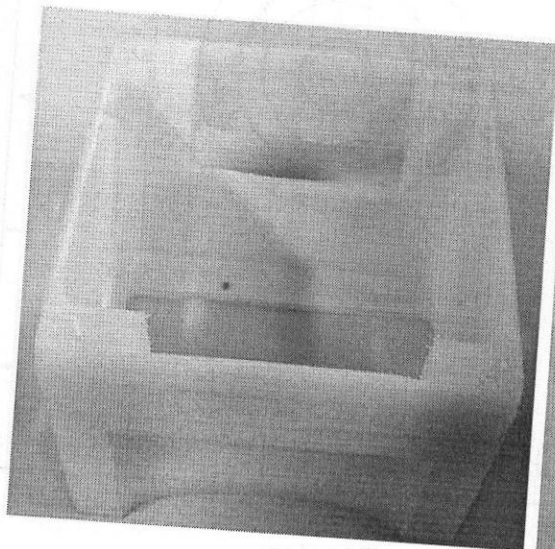


Figura 6.6: Base do robo - Modelo Real

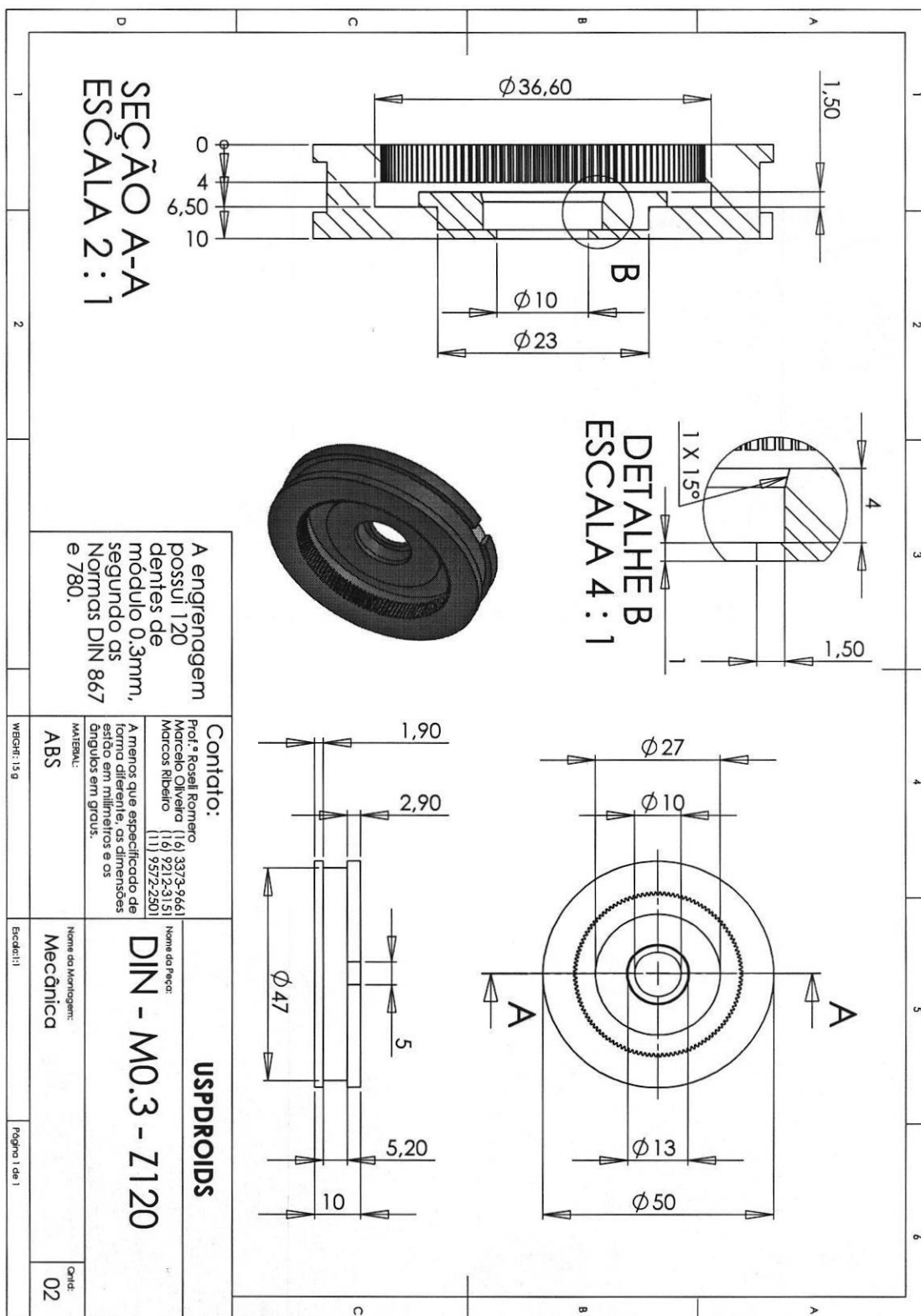


Figura 6.7: Roda - Desenho Técnico

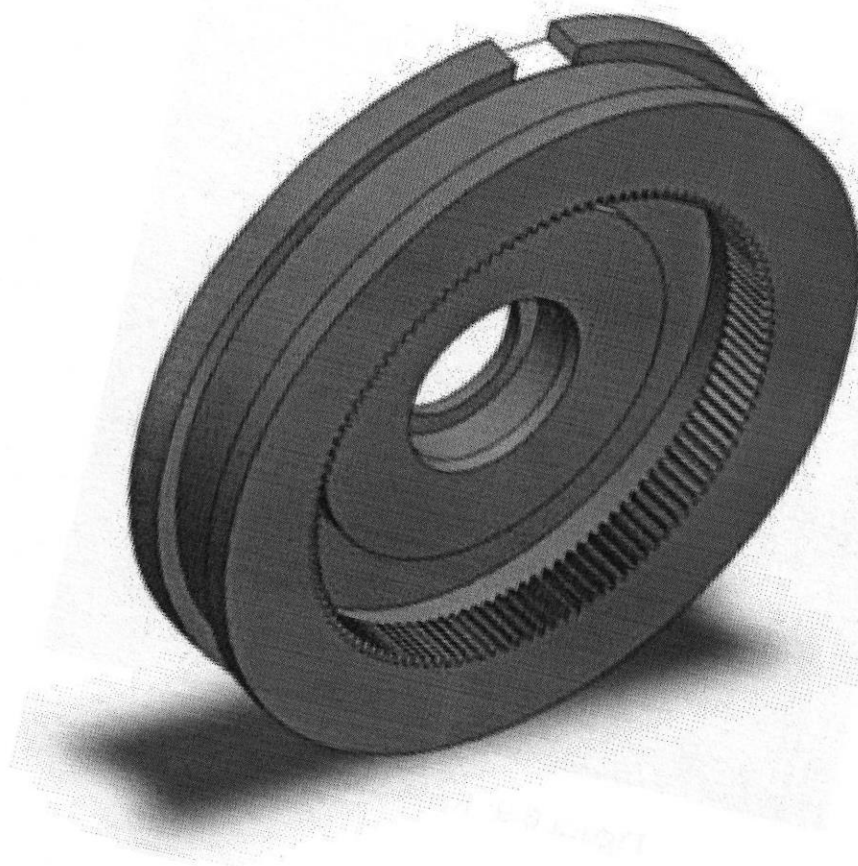


Figura 6.8: Roda - Renderizado 3D

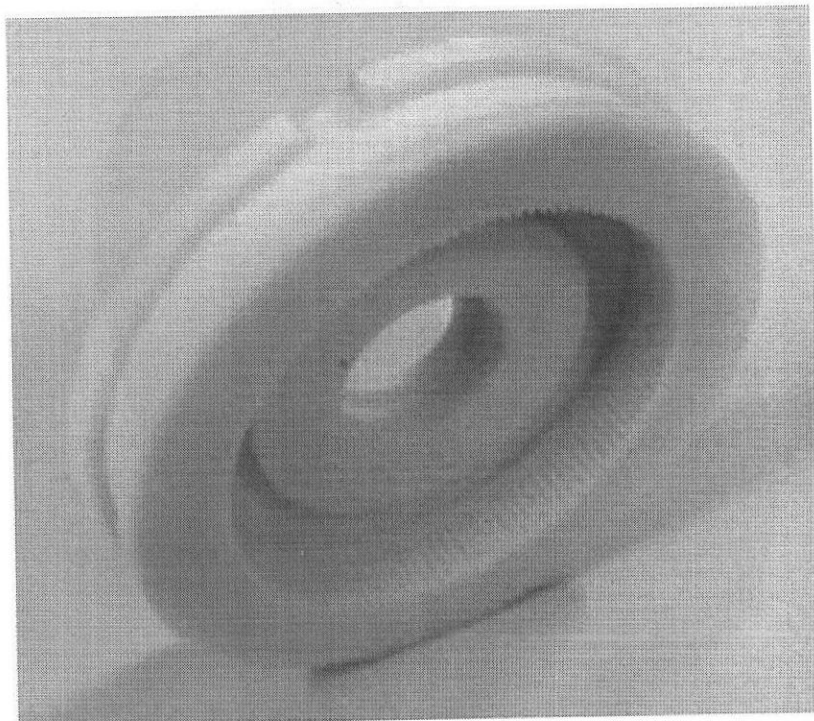


Figura 6.9: Roda - Modelo Real

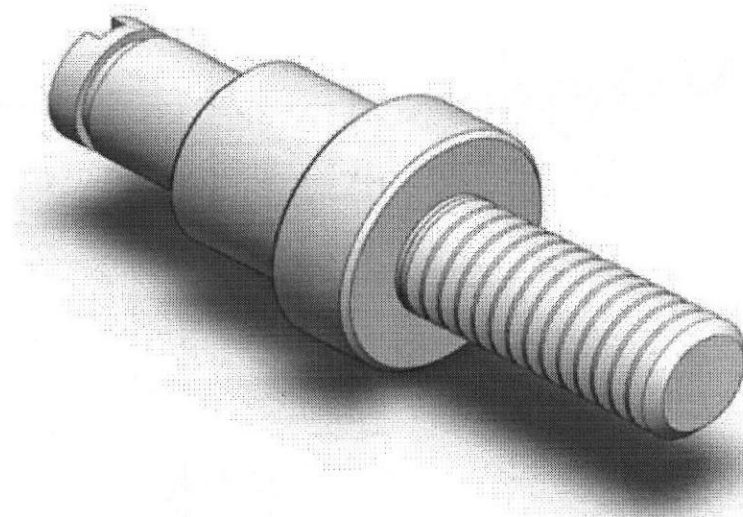


Figura 6.11: Eixo da Roda - Renderizado 3D

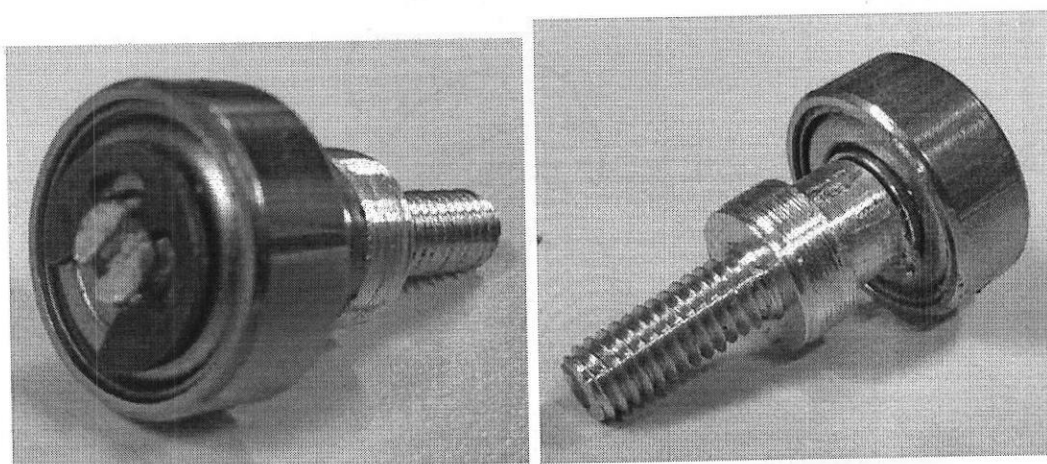


Figura 6.12: Eixo da Roda - Modelo Real

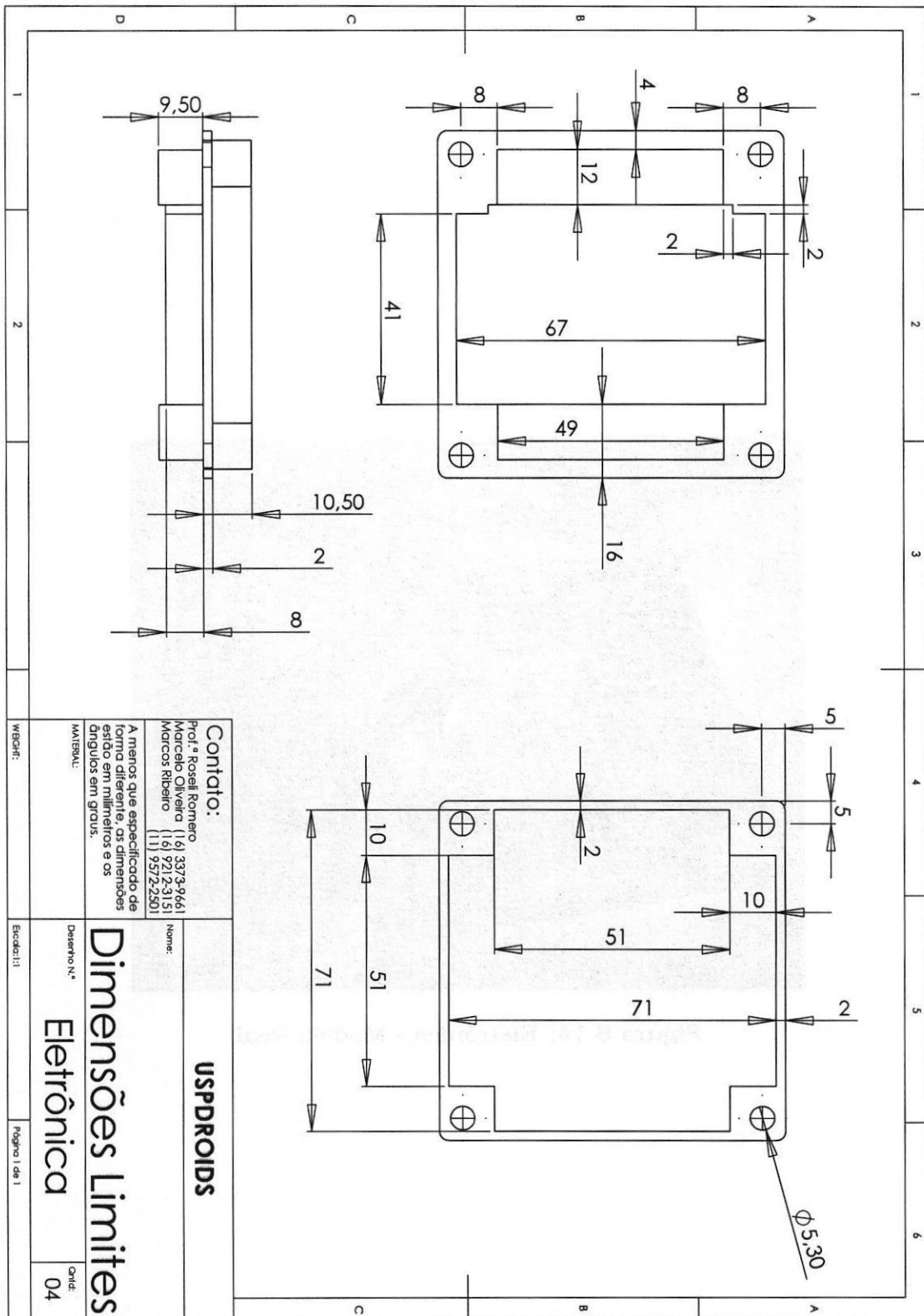


Figura 6.13: Eletrônica - Desenho Técnico

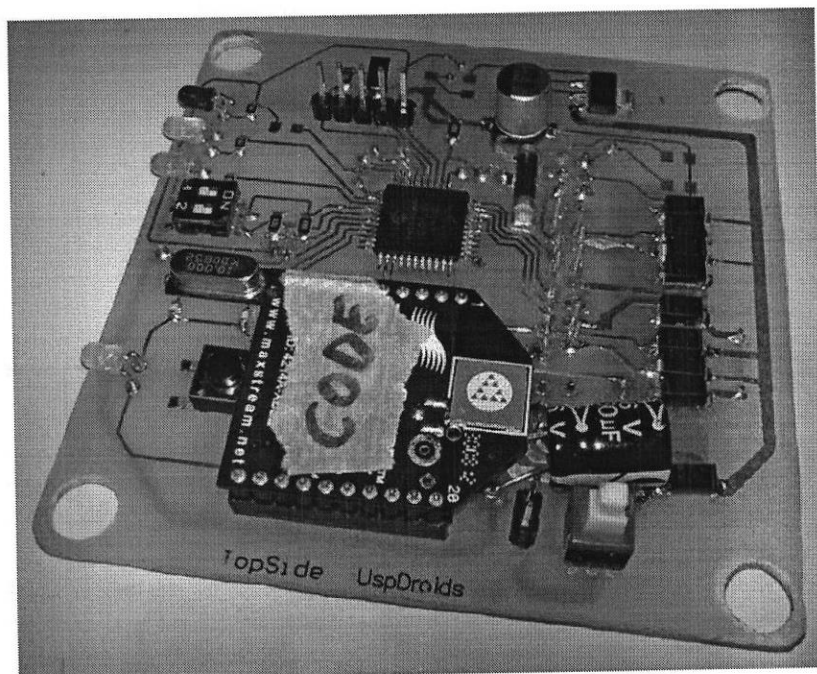


Figura 6.14: Eletrônica - Modelo Real

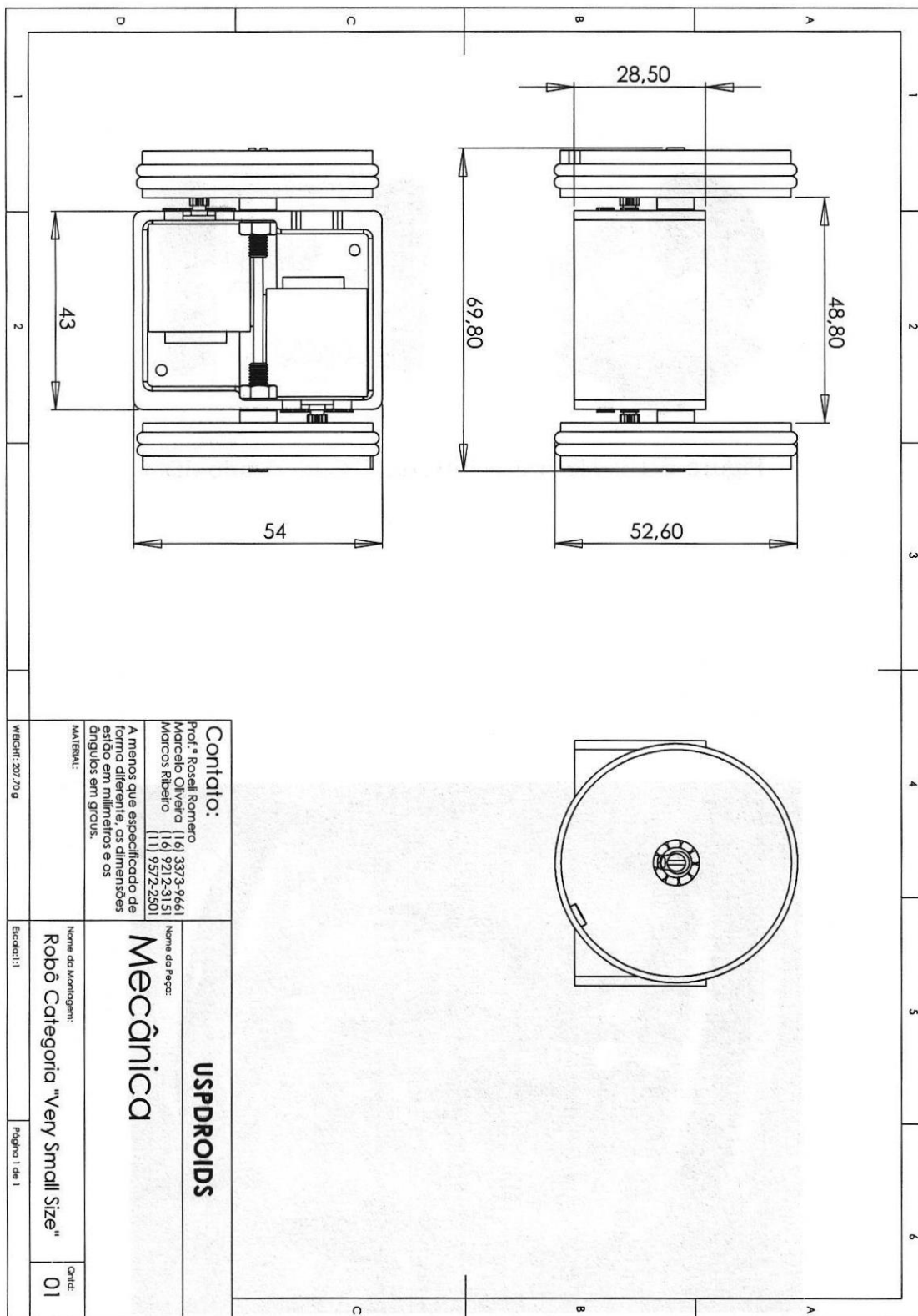


Figura 6.15: Mecânica Interna - Desenho Técnico

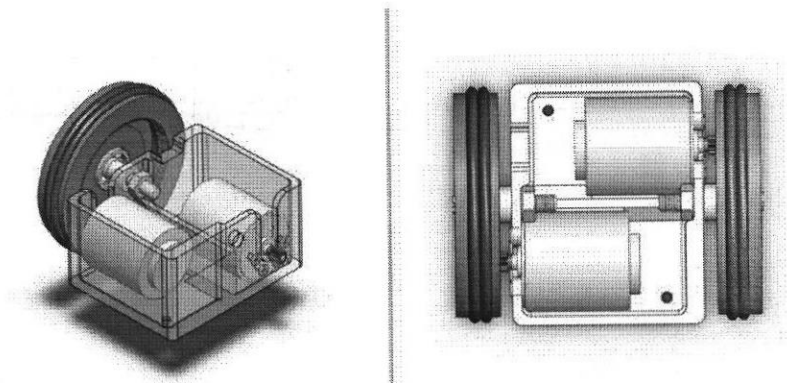


Figura 6.16: Mecânica Interna - Renderizado 3D

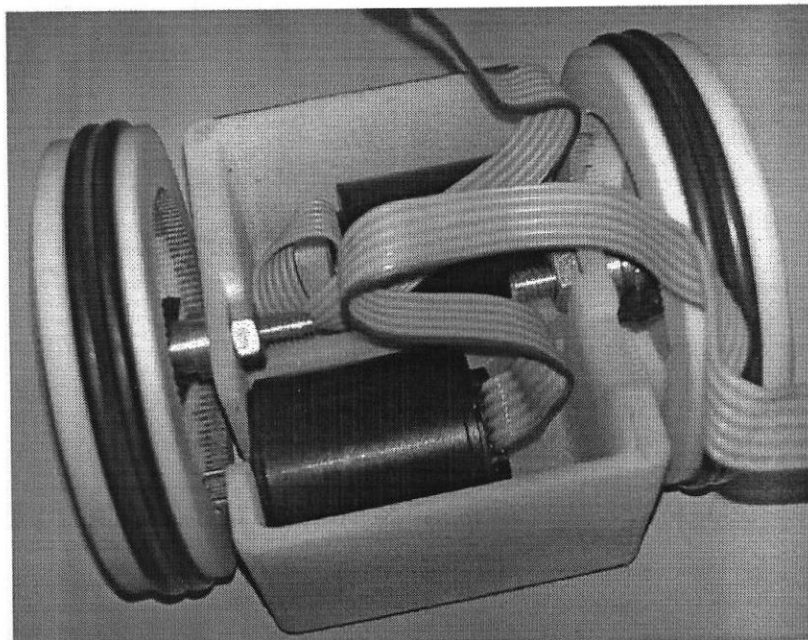


Figura 6.17: Mecânica Interna - Modelo Real

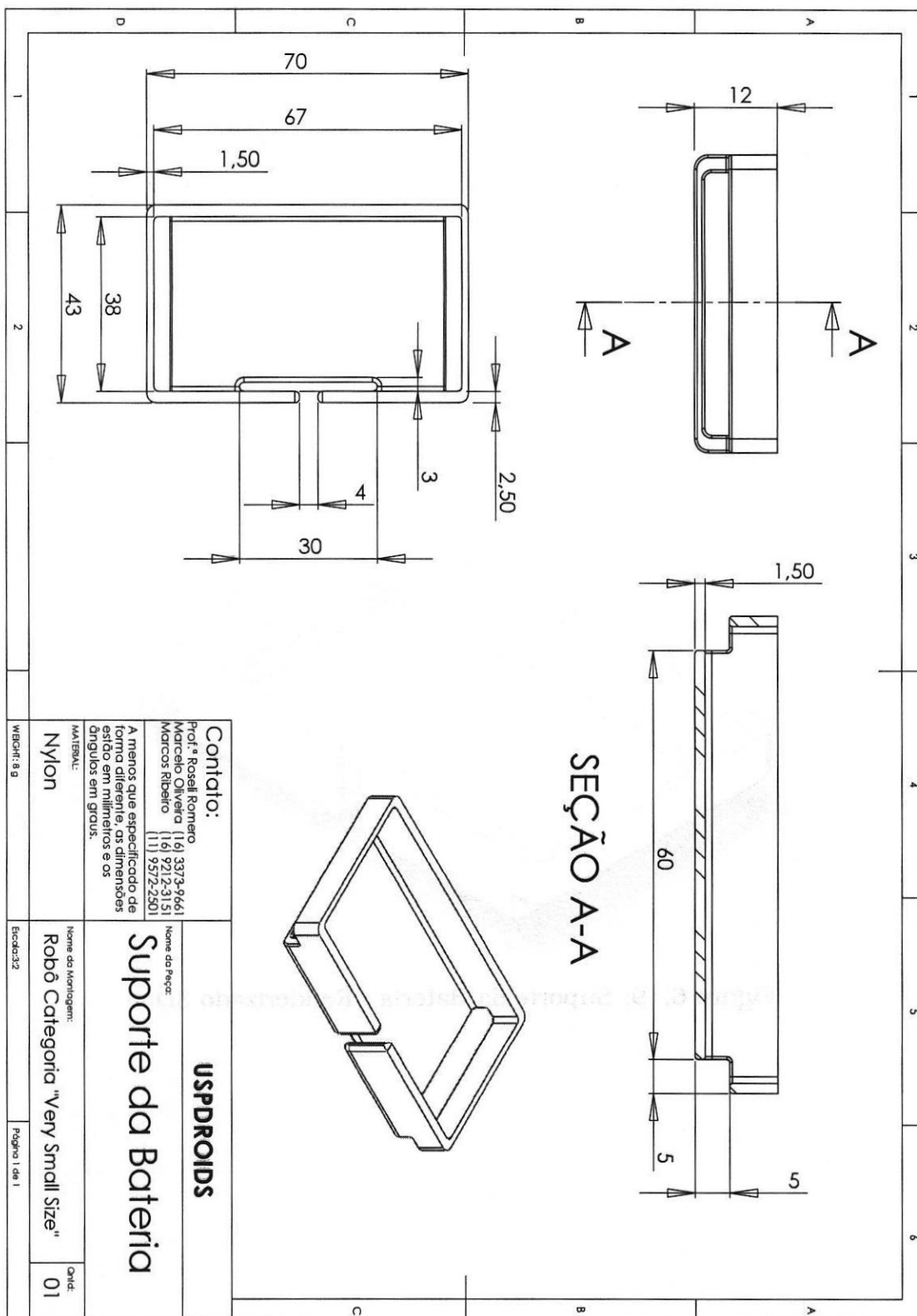


Figura 6.18: Suporte da Bateria - Desenho Técnico

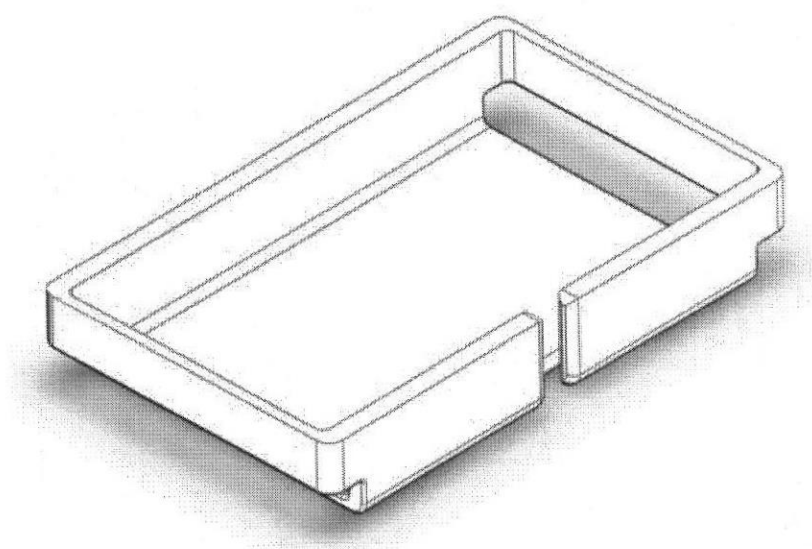


Figura 6.19: Suporte da Bateria - Renderizado 3D

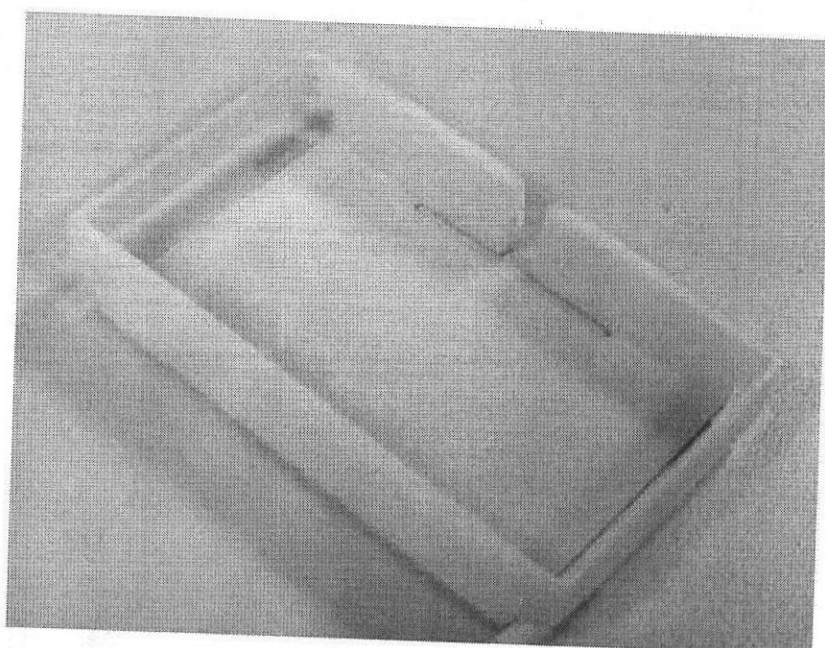


Figura 6.20: Suporte da Bateria - Modelo Real

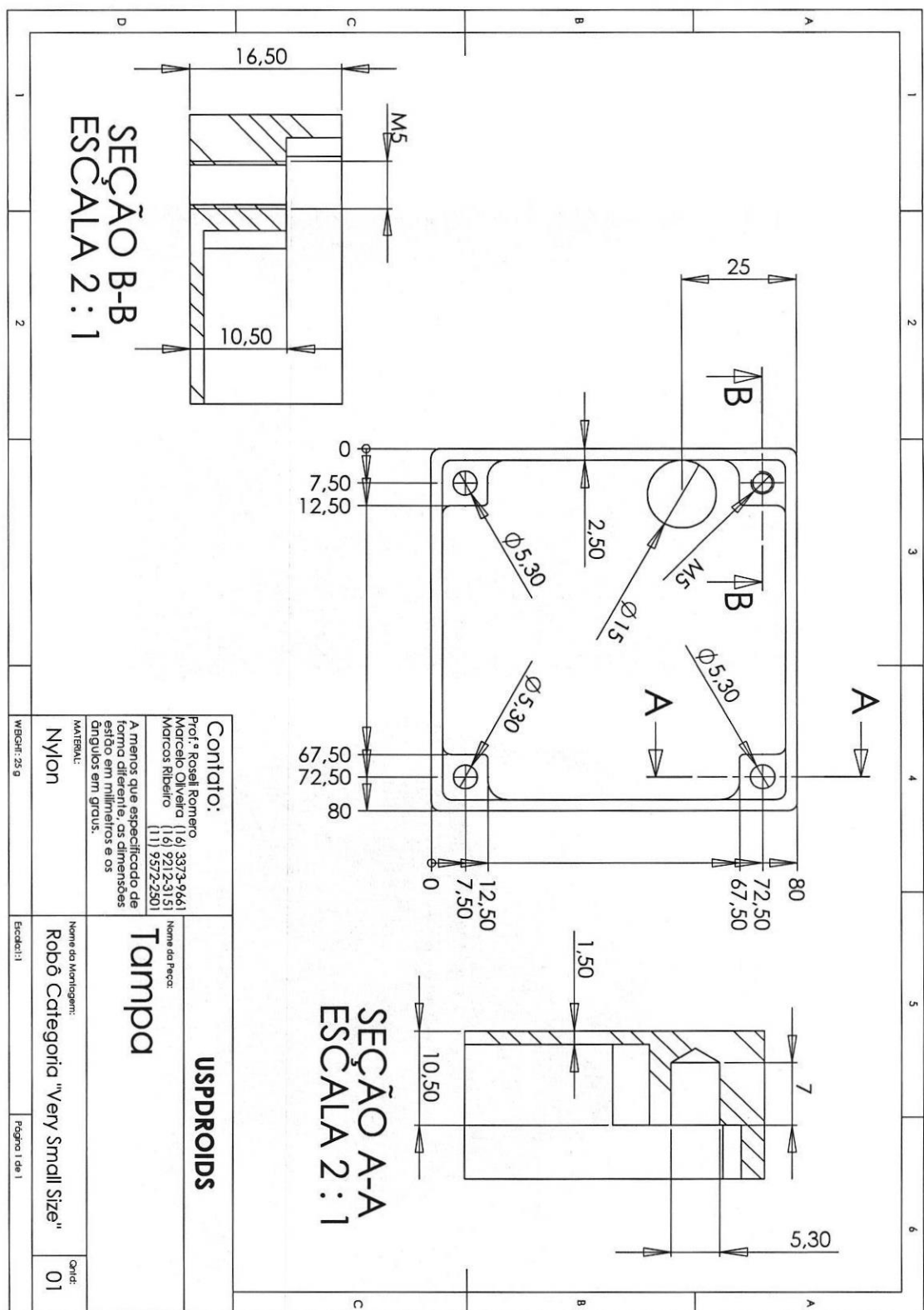


Figura 6.21: Tampa - Desenho Técnico

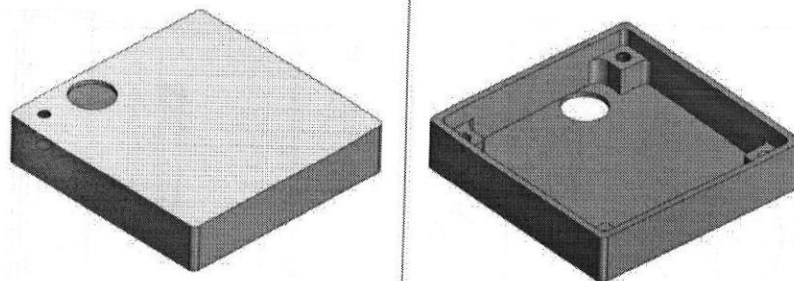


Figura 6.22: Tampa - Renderizado 3D

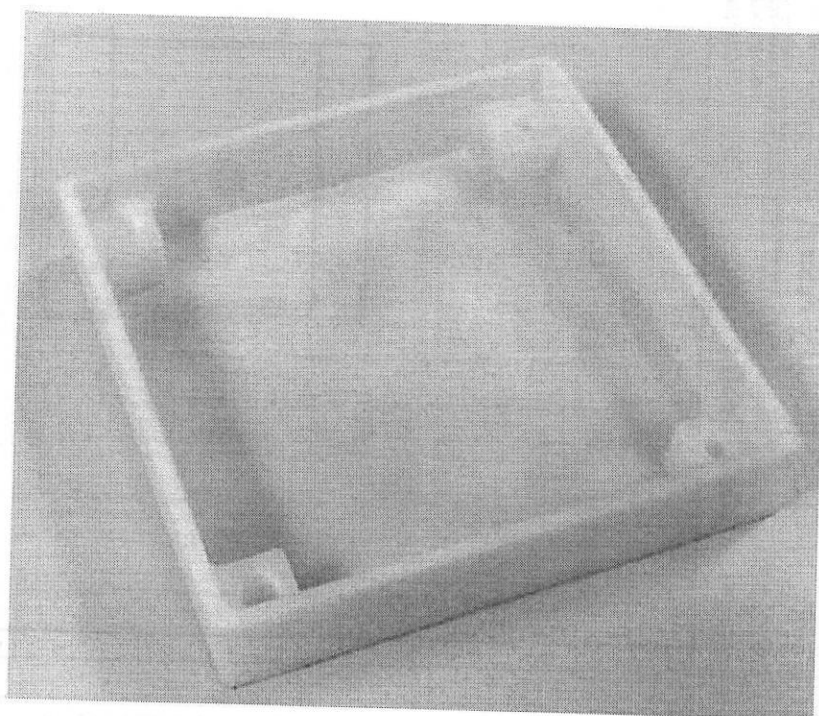


Figura 6.23: Tampa - Modelo Real

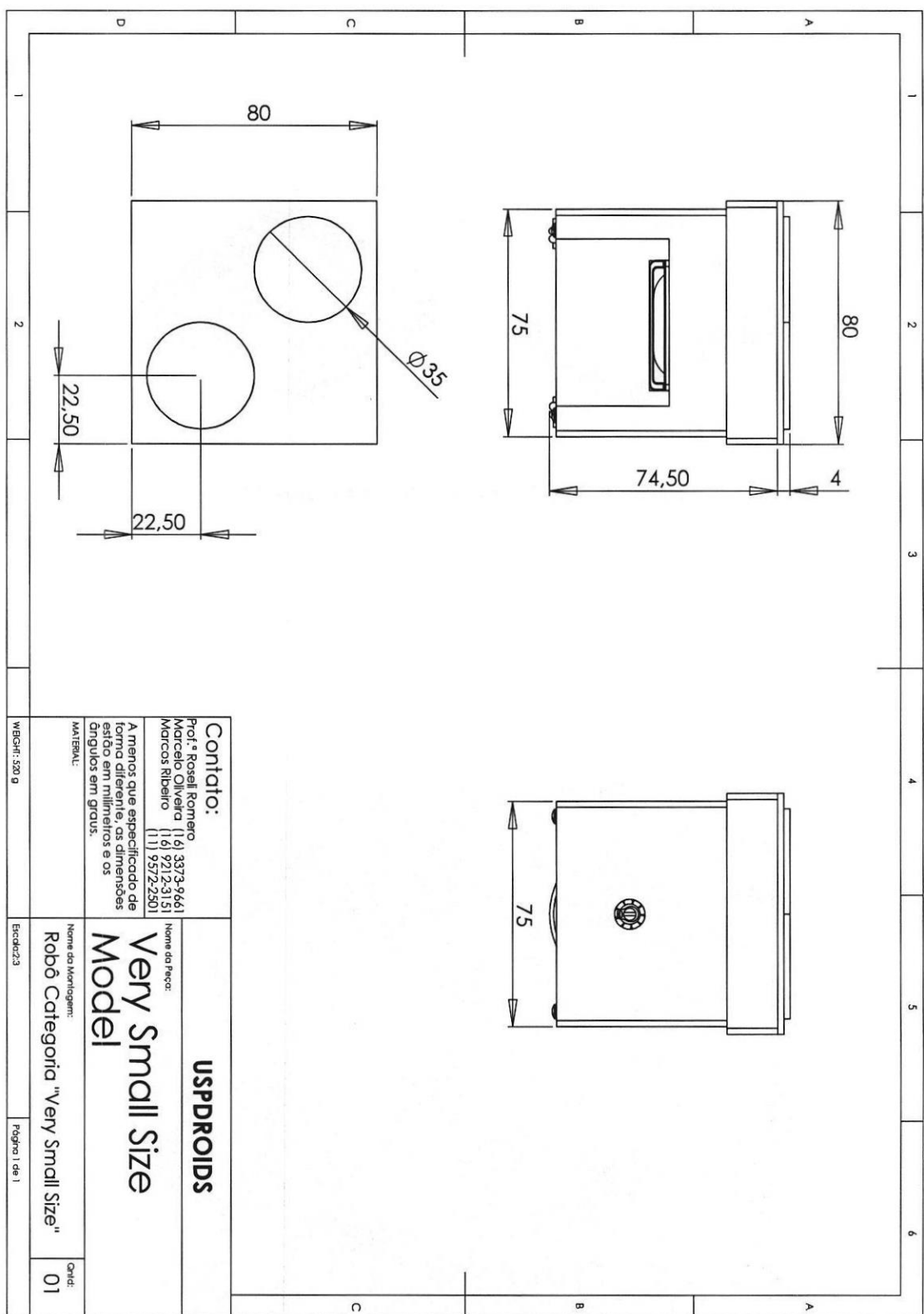


Figura 6.24: Modelo Completo - Desenho Técnico



Figura 6.25: Modelo Completo- Renderizado 3D

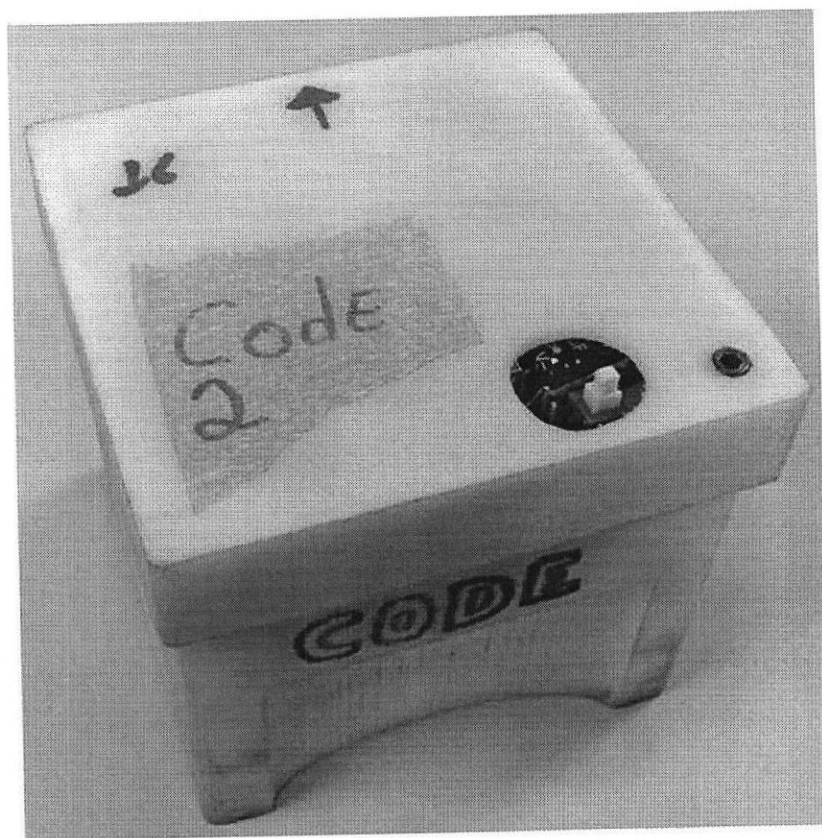


Figura 6.26: Modelo Completo - Modelo Real

Considerações Finais

Após o término deste projeto, após a competição e após vários testes com as peças e os robôs produzidos, podemos dizer que a frase "Tempo gasto em projeto é tempo economizado em revisões e testes", é sem dúvida uma das mais importantes dentro da engenharia.

Foi gasto muito tempo em projeto e revisões do que se foi feito para que se produzisse a primeira versão física do robô, o que ocorreu somente em meados de julho de 2009. Entre esta versão e a versão final, foram necessárias apenas duas revisões, uma devido à peculiaridades do processo de fabricação e do material utilizado, outra devido a uma reconfiguração necessária à placa de circuito impresso.

Olhando e analisando tudo que foi feito, pode-se afirmar com certeza que não existe engenharia sozinha, é necessária a interação com todas as esferas de projeto.

Os robôs testados se mostraram capazes de locomoção em diversos tipos de piso, sendo então capazes de ser utilizados em usos diversos do futebol de robôs.

Por último, mas não menos importante, muitos contatos foram feitos, principalmente com o CTI, em Campinas, que além de um centro de excelência em prototipagem rápida é também um centro de pesquisa em robótica, possuindo diversas áreas de pesquisa comuns ao USPDroids e ao próprio LAR, e que pode vir a ser, num futuro, um excelente parceiro.

7.1 *Trabalhos Futuros*

Diversos são os trabalhos que ainda podem e devem ser realizados sobre esta arquitetura. De início, apresentamos alguns problemas dela, que podem servir de guia para futuros trabalhos, no intento de se encontrar soluções:

Custo total Por usar motores importados com leitores de velocidade diretos do fabricante do motor, que custam em torno de *US\$170* cada, componentes eletrônicos SMD e peças feitas por prototipagem rápida, o custo total de cada robô pode ser estimado em *R\$1500*. Quando se acrescenta neste cerca de *US\$1500* por um laser de boa qualidade, alguns sonares, baterias e circuito eletrônico para utilizá-los, o custo de cada robô ultrapassa os *R\$4000*, sendo então comparável ao preço de alguns robôs de renome;

Engrenagem interna O sistema de redução foi feito através de prototipagem rápida, mas como as dimensões, exigidas pela engrenagem acoplada aos motores utilizados, eram bastante próximas da resolução da máquina, a engrenagem interna à roda não obteve a qualidade desejada. O sistema é funcional e pode ser utilizado, mas folgas existem e estas podem atrapalhar o bom rendimento do robô, bem como interferir na previsão dos sistemas inteligentes. Ainda, o desgaste dela é razoavelmente rápido, variando conforme a intensidade das folgas. Encontrar outras formas de se fabricar esta peça, ou outros materiais, diminuindo as folgas e aumentando a resistência da peça, traria vantagens incalculáveis para o uso como ambiente de testes de simulações computacionais;

Caixa de redução A caixa de redução utilizada no robô possui uma redução direta de alta ordem, fato desaconselhado entre especialistas em elementos de máquina. Apesar desta alta ordem, devido à alta potência dos motores, aliada ao grande diâmetro da roda, o robô possui uma velocidade final bastante elevada, em torno de 2m/s. Diminuir a relação de redução direta, e aumentar a redução final pode tornar o robô mais fácil de ser controlado pelos sistemas de inteligência artificial e de controle.

7.2 *Agradecimentos*

Lembramos aqui que todo o processo de fabricação de peças e componentes nos foi feito sem nenhum ônus pelo CTI através do Programa ProEXP (Prototipagem Rápida Aplicada à Experimentos Científicos) e que a questão de minimização do custo é uma questão de princípios que norteiam algumas pesquisas de nosso laboratório e de nosso grupo de pesquisa.

Bibliografia

- Ashoka Group (2010). Gear types. <http://www.gearshub.com/gears-types.html>.
- ASTM (2009). *ASTM D638-08: Standart Test Methods for Tensile Properties of Plastics*. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania(USA).
- Augusto Silva Pereira, G., Borges Torres, F., e Campos, M. F. M. (2004). Desenvolvimento de robôs holonômicos de baixo custo para o estudo de robótica móvel. Em *Anais do XV Congresso Brasileiro de Automática (CBA'04)*, Gramado, RS.
- Costa, A. H. e Pegoraro, R. (2000). Construindo robôs autônomos para partidas de futebol: O time guaraná. *SBA Controle e Automação*.
- Gordo, N. e Fereira, J. (2000). *Apostila de Elementos de Máquinas para o Curso de Mecânica*, chapter 33. TeleCurso 2000.
- Gorni, A. A. (2001). Prototipagem rápida: O que é, quem faz e por que utilizá-la. *Revista Plástico Industrial*, pages 230–239.
- IEEE (2008). *Rules for IEEE Very Small Competition*. IEEE, 1.0 edition. These rules are based on the Mirosot FIRA robot soccer category and they are specific for the IEEE Latin American Students Robotics Competition Very Small Size category.
- Kitano, H., Asada, M., Kuniyoshi, Y., Noda, I., e Osawa, E. (1995). Robocup: The robot world cup initiative. Em *Proc. of IJCAI-95 Workshop on Entertainment and AI/Alife*, Montreal.
- Kitano, H., Asada, M., Kuniyoshi, Y., Noda, I., Osawa, E., e Matsubara, H. (1997). Robocup: A challenge problem for ai and robotics. *AI Magazine*, 18(1):73–85.

- Kruf, W., Vorst, B. V., Maalderink, H., e Kamperman, N. (2006). Design for rapid manufacturing functional sls parts. *Intelligent Production Machines and Systems*, 2.
- Mackworth, A. K. (1993). On seeing robots. Em Basu, A. e World, X. L., editors, *Computer Vision: Systems, Theory, and Applications*, pages 1–13. World Scientific Press, Singapore.
- Meggiolaro, M. A. (2009). *RioBotz Combat Tutorial version 2.0*. PUC-Rio, Rio de Janeiro.
- Nice, K. (2010). Como funcionam as engrenagens. HowStuffWorks Brasil - <http://ciencia.hsw.uol.com.br/engrenagens.htm>.
- Oliveira, M. F. (2008). Aplicações em protoripagem rápida em projetos de pesquisa. Master's thesis, Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - DEMA/FEM/UNICAMP.
- Penharbel, E. A., Gonçalves, B. H., Melo, D. O., Silva, M. O., Futida, I., e Romero, R. A. F. (2007). Descrição do time de futebol de robôs uspdroids. Team Description Paper on CBR2007.
- Ribeiro, M., da Silva, M., Romero, R. F., Oliveira, M., e da Silva, J. V. L. (2010). Development of functional micro mobile robots using rapid manufacturing techniques with application in soccer robots. Em *Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA'10)*, Bonito, MS.
- Silva, M. O., Melo, D. O., Gonçalves, B. H., Silva, R. C. R., e Romero, R. A. F. (2008). O sistema integrado do time de futebol de robôs uspdroids. Team Description Paper on Latin American Robots Competition.
- Silva, M. O., Ribeiro, M. V. F., Gaspar, L. S., Silva, W. C., Montanari, R., e Romero, R. A. F. (2009). O sistema do time de futebol de robôs uspdroids. Team Description Paper on CBR2009.
- Stipkovic Filho, M. (2001). *Engrenagens*. Editora Printon, 1 edition. ISBN 8570300344.
- Thomas, P. e Stonier, R. (2002). Fuzzy control in robot-soccer, evolutionary learning in the first layer of control. Em Callaos, N., Bica, M., e Sanchez, M., editors, *6TH WORLD MULTICONFERENCE ON SYSTEMICS, CYBERNETICS AND INFORMATICS, VOL XII, PROCEEDINGS - INDUSTRIAL SYSTEMS AND ENGINEERING II*, pages 181–186. INT INST INFORMATICS & SYSTEMICS.

USDD (1975). *MIL-HDBK-700A: Military Standardization Handbook of Plastics*. United States Department of Defense, Washington, D. C. (USA).

Volpato, N. (2007). *Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicação*. Editora Blücher. 239 p.

Yao, C.-H. (2008). Automotive transmissions: Efficiently transferring power from engine to wheels. <http://www.csa.com/discoveryguides/auto/review4.php>.