

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

VINÍCIUS NICASSIO FERREIRA

**CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ HUMANOIDE PARA A ROBOCUP HUMANOID
TEENSIZE LEAGUE**

São Bernardo do Campo
2016

VINÍCIUS NICASSIO FERREIRA

**CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ HUMANOIDE PARA A ROBOCUP HUMANOID
TEENSIZE LEAGUE**

Relatório final apresentado ao Centro Universitário
da FEI, orientado pelo Prof. Dr. Reinaldo Bianchi.

São Bernardo do Campo
2016

“Cem vezes todos os dias lembro a mim mesmo
que minha vida interior e exterior, depende dos
trabalhos de outros homens, vivos ou mortos,
e que devo esforçar-me a fim de devolver na
mesma medida que recebi.”

Albert Einstein

RESUMO

O projeto consiste no estudo e aperfeiçoamento de um robô humanoide projetado e construído no Centro Universitário FEI, destinado a aplicações em pesquisas e apto a participar de competições de futebol entre robôs organizadas a nível mundial pela RoboCup. Para tal, o projeto obedece as regras das categorias Humanoide KidSize e Humanoide TeenSize. Na realização do projeto foram estudadas as técnicas de otimização topológica, método dos elementos finitos e ensaios de resistência. No final do projeto obtivemos um robô apto para os primeiros ensaios práticos de motores e uma análise mais aprofundada sobre a otimização topológica.

Palavras-chave: Robôs Humanoides; Equilíbrio; Ensaio de tração; RoboCup; Humanoid-League; JAX.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 1 – Robôs humanoides corporativos	7
Ilustração 2 – Robô Baset e Milton	8
Ilustração 3 – Desafio RoboCup:Push Recovery.	9
Ilustração 4 – Desafio RoboCup:Goal-Kick from Moving Ball.	10
Ilustração 5 – RoboFEI - <i>SmallSize</i>	11
Ilustração 6 – RoboFEI - <i>@Home</i>	11
Ilustração 7 – RoboFEI - Humanoid.	12
Ilustração 8 – Robô Baset.	13
Ilustração 9 – Foto DARwIn-OP.	18
Ilustração 10 –Curva tensão-deformação.	20
Ilustração 11 –Exemplo de otimização de uma estrutura com carregamento simples. .	23
Ilustração 12 –Resultado de otimização topologica simples.	24
Ilustração 13 –Suavizando a peça.	25
Ilustração 14 –Corpo de Prova.	27
Ilustração 15 –Instron 5567.	28
Ilustração 16 –Gráficos para os corpos de 30%.	29
Ilustração 17 –Gráficos para os corpos de 60%.	30
Ilustração 18 –Gráficos para os corpos de 80%.	31
Ilustração 19 –Corpo de prova com 100%.	32
Ilustração 20 –Gráficos médio para os corpos.	33
Ilustração 21 –Diferenças dos calcanhares.	34
Ilustração 22 –Desenho braço.	35
Ilustração 23 –Diferenças dos peitos.	36
Ilustração 24 –Novo NUC.	36
Ilustração 25 –Cravos nos pés.	37
Ilustração 26 –Montagem da perna a ser simulada.	39
Ilustração 27 –Posicionado apoios e juntas para as simulações do robô ereto.	40
Ilustração 28 –Material retirado para as simulações do robô ereto.	41
Ilustração 29 –Posicionado apoios e juntas para as simulações do com as pernas flexionadas.	42
Ilustração 30 –Material retirado para as simulações do com as pernas flexionadas.	43

SUMÁRIO

1	<i>Introdução</i>	7
1.1	<i>Robôs Humanoides</i>	7
1.2	<i>RoboCup</i>	8
1.3	<i>RoboFEI</i>	10
1.4	<i>Objetivo</i>	12
1.5	<i>Justificativa</i>	13
2	<i>Regras RoboCup</i>	15
2.1	<i>Dimensões</i>	15
2.1.1	<i>Área do Pé</i>	15
2.1.2	<i>Largura do robô</i>	15
2.1.3	<i>Braços</i>	16
2.1.4	<i>Máxima extensão</i>	16
2.1.5	<i>Penas</i>	16
2.1.6	<i>Cabeça</i>	16
2.2	<i>Categorias</i>	16
2.2.1	<i>KidSize</i>	16
2.2.2	<i>TeamSize</i>	17
2.2.3	<i>AdultSize</i>	17
3	<i>Revisão Bibliográfica</i>	18
3.1	<i>Robôs Humanoides</i>	18
3.1.1	<i>Robôs Humanoides da RoboCup</i>	18
3.2	<i>Ensaio de tração</i>	19
3.2.1	<i>Região de Comportamento Elástico – Regime Elástico</i>	21
3.2.1.1	<i>Módulo de elasticidade transversal (G)</i>	21
3.2.1.2	<i>Coeficiente de Poisson (ν)</i>	22
3.3	<i>Optimização topológica</i>	22
3.3.1	<i>Otimização Topológica computacional</i>	23
3.3.1.1	<i>Carga variável</i>	25
4	<i>Projeto</i>	26
4.1	<i>Ensaios de tração</i>	26
4.1.1	<i>Resultados</i>	28

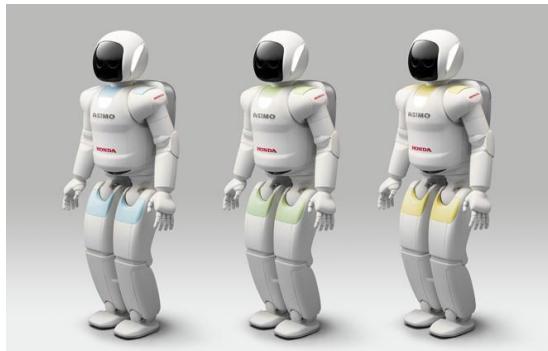
4.2	<i>Desenhos</i>	33
4.2.1	<i>Calcanhar</i>	34
4.2.2	<i>Braços</i>	34
4.2.3	<i>Peito</i>	35
4.2.4	<i>Cravos</i>	37
4.3	<i>Simulações</i>	38
4.3.1	<i>Carga nos motores</i>	38
4.3.2	<i>Otimização topológica simples</i>	38
4.3.2.1	<i>Ereto</i>	39
4.3.2.2	<i>Pernas flexionadas</i>	41
5	<i>Conclusão</i>	44
	<i>REFERÊNCIAS</i>	46

1 INTRODUÇÃO

1.1 Robôs Humanoides

Com o avanço da tecnologia embarcada e mecânica móvel, hoje se tem uma grande busca no aperfeiçoamento de robôs humanoides, como por exemplo o ASIMO¹ (HONDA MOTORS, 2015) (figura 1a) que tem como objetivo ajudar em tarefas domésticas e até fazer companhia a alguém, o HRP-4 (KAWADA INDUSTRIES, 2015), que tem como objetivo principal a substituição de pessoas que trabalham em locais perigosos ou com trabalhos repetitivos/desgastantes (objetivo básico de toda a automação realizada), o iCub² (ROBOTCUB CONSORTIUM, 2015), tem como ideia básica a criação de um robô que tenha funções cognitivas semelhantes a de um humano e assim fazer ele interagir com o mundo ao seu redor e aprender a "viver" nele assim como um bebê ou uma criança faz.

Figura 1 – Robôs humanoides corporativos



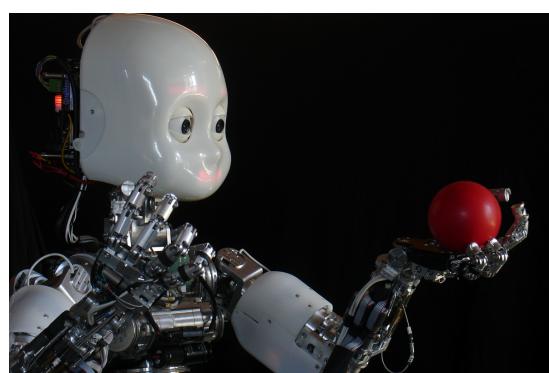
(a) ASIMO.

Fonte: 33rd Square, 2015.



(b) HRP-4.

Fonte: 33rd Square, 2015.



(c) iCub.

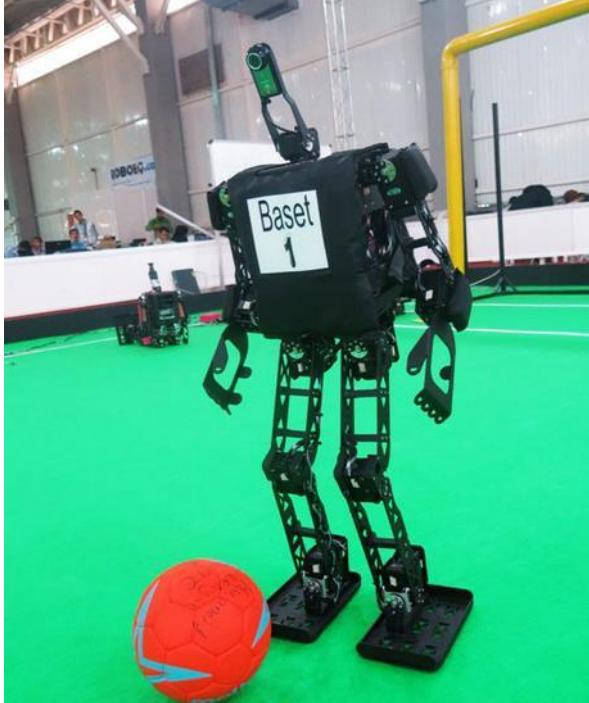
Fonte: 33rd Square, 2015.

¹Advanced Step in Innovative MObility

²Cognitive Universal Bodys

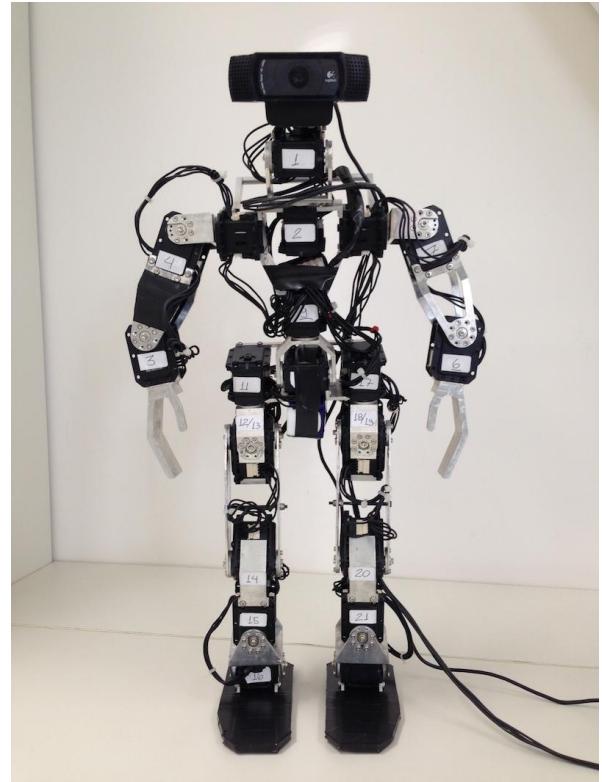
Entretanto, a base de pesquisa a ser utilizada será o robô de umas das equipes da última RoboCup (2014) (ROBOCUP, 2015), o Baset (BASET PAZHUUH TEHRAN, 2015), pertencente a equipe de Israel (Figura 2a) e o robô Milton (CORTEZ; BIANCHI, 2011) que foi desenvolvido e construído na FEI (Figura 2b).

Figura 2



(a) Baset.

Fonte: Baset Pazhuh Tehran, 2015.



(b) Milton.

Fonte: Autor.

Ambos os robôs são desenvolvidos para que possam de forma autônoma jogar futebol, considerando o robô fabricado pela FEI, o Milton tem 22 servos motores e seu corpo é feito inteiramente de alumínio aeronáutico e dentro dele tem um fit-PC2i (COMPULAB, 2015) responsável pelo controle dos motores, processamento da câmera e todas as demais funções.

1.2 RoboCup

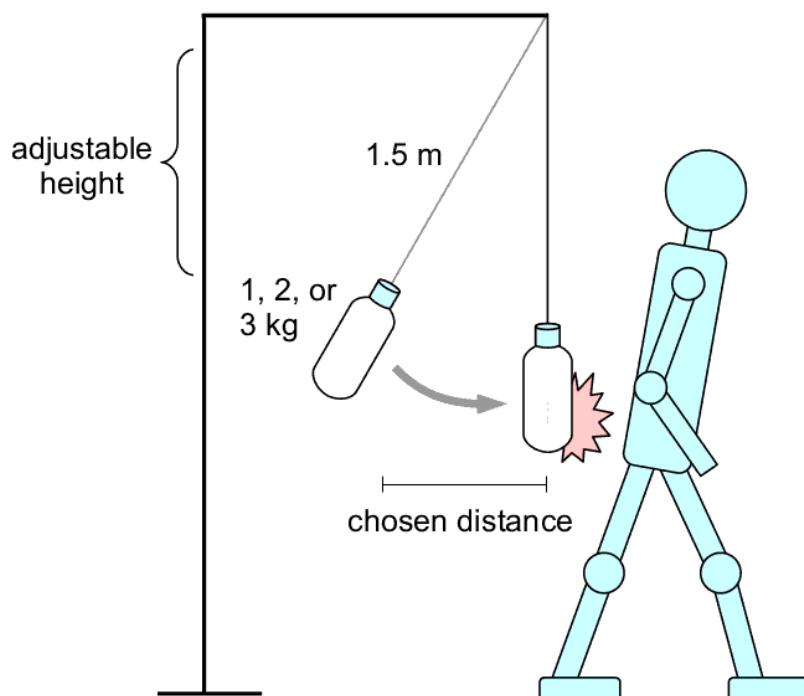
A RoboCup Soccer Humanoid League é uma competição mundial de futebol de robôs, tendo as mesmas regras de uma competição de futebol da FIFA, pois um dos objetivos é que em 2.050 o campeão da RoboCup possa jogar com os campeões da Copa do Mundo, a RoboCup serve como uma grande ferramenta de pesquisa mundial onde equipes se junta para competir

com no máximo quatro jogadores em cada time, com algumas alterações que tem relação ao tamanho do campo e da bola para uma proporção dos jogadores o jogo ocorre de forma autônoma onde os humanoides apenas por uma câmera e a comunicação entre eles tem que jogar entre si.

Além dos jogos de futebol a RoboCup também tem os desafios técnicos que são:

Push Recovery: Consiste em um pendulo de garrafa PET cheia de água ou areia batendo no robô que pode estar na posição ereta ou andando no mesmo lugar, o objetivo da prova é testar o quanto o robô é capaz de suportar um impacto sem cair.

Figura 3 – Push Recovery.



Fonte: RoboCup, 2015.

Goal-Kick from Moving Ball: O objetivo deste desafio é, com a bola em movimento, chutar ela em direção ao gol. Uma rampa irá ser colocado numa posição fixa , de tal forma que ao soltar a bola da rampa ela irá na direção do robô. A altura da rampa é ajustável e determina a velocidade inicial da bola. As equipes podem colocar um robô em qualquer lugar no campo. Após a bola ter sido liberada, o robô deve localizar a bola e chutar.

Figura 4 – Goal-Kick from Moving Ball.

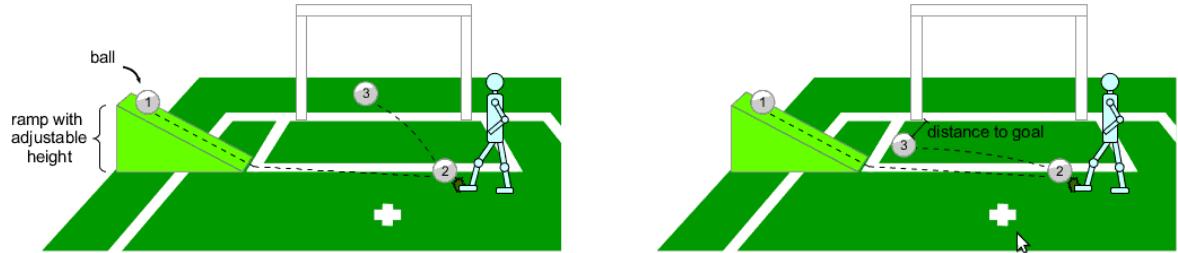


Figure 7: Successful (left) and partially successful (right) goal-kick from a moving ball challenges.

Fonte: RoboCup, 2015.

High Jump: Neste desafio o robô tem que realizar um salto vertical em cima de uma plataforma de 40 x 40 cm onde deve permanecer o maior tempo possível no ar e ao cair tem que se manter no mínimo 3 segundo estável em cima da plataforma. Para isso um sensor de pressão é colocado na plataforma para medir o tempo em que o robô fica no ar.

High-Kick Challenge: Neste momento a bola é colocada na marca do pênalti e o humanoide à uma distância mínima de 30 cm da bola. Após ser posicionado, o humanoide deve ir até a bola e realizar um chute onde atinja a altura mínima de um terço do seu diâmetro. A pontuação é dada em relação a altura máxima que a bola atingiu.

O que conseguimos observar é que a cada competição novos desafios são criados e novas adaptações são necessárias para manter um humanoide, e a tendência é chegar a um humanoide de tamanho adulto para jogar com pessoas de forma igualitária, e tanto o jogo quanto os desafios levam a este objetivo.

1.3 RoboFEI

Hoje na FEI temos o RoboFEI, são diversas equipes que trabalham com robótica, dentre elas temos o *SmallSize* que são robôs omnidirecional que são controlados por um computador externo, este computador recebe informações de 2 câmeras que ficam em cima do campo e toma decisões sobre a estratégia que deve ser tomada, e manda via rádio para todos os robôs em campo. Toda a estrutura dos robôs e software foram desenvolvidos na própria faculdade pelos seus alunos e professor responsável, neste caso o Prof. Dr. Flávio Tonidandel.

Figura 5 – Robô da competição *SmallSize* desenvolvido na FEI.



Fonte: Autor.

Figura 6 – Robô da competição *@Home* utilizado para pesquisa com interação homem-robô.



Fonte: Autor.

Outra equipe que temos é a *@Home*, esta equipe tem por sua vez construir um robô doméstico, onde através de uma série de sensores eles possam detectar pessoas e objetos e interagir com o ambiente a sua volta fazendo algumas tarefas simples como seguir uma pessoa, reconhecer objetos distintos em qualquer ordem, responder algumas perguntas, este projeto é coordenado pelo Prof. Dr. Plínio Thomaz. Também temos a equipe Humanoid, que por sua vez participa hoje da categoria KidSize, este robô tem como objetivo jogar futebol, e para isso ele usa um NUC em seu peito que recebe a imagem da câmera e localiza a bola, outros jogadores, linhas de campo e o gol, com todos esses dados ele se localiza em campo e com essas informações compartilhas via rede WiFi os robôs tomam todas as decisões, este projeto tem como responsável o Prof. Dr. Reinaldo Bianchi.

Figura 7 – Equipe do RoboFei - Humanoid.



Fonte: Blog da FEI, 2015.

Entretanto para a equipe *Humanoid* se percebe uma tendência na liga, onde visamos o "crescimento" dos robôs. Atualmente estudamos novos métodos para o desenvolvimento de um robô com maior estatura. Acreditamos nisso, pois novos desafios são colocados a fim de incentivar as equipes a desenvolver robôs da categoria Adult. Com uma inteligência mais abrangente do mundo ao seu redor, ou seja, usando qualquer tipo de bola e um campo de futebol que não tenha nenhuma adaptação, como por exemplo traves amarelas e landmarks no gramado.

1.4 Objetivo

Esta iniciação tem como foco principal o aperfeiçoamento e a melhoria dos robôs humanoides da equipe da FEI. Contamos com 3 impressoras 3D onde produzimos algumas peças secundárias para o aperfeiçoamento dos robôs e suas partes com a finalidade de obtermos melhores desempenhos. Algumas peças do robô foram remodeladas para ajudar no controle e estudo de esforços, as peças foram feitas para que pudessemos aplicar a otimização topológica.

Para realizar uma boa análise, um ensaio de tração foi realizado com a finalidade de se obter as características do material, neste caso o ABS³. Na competição de humanoides, temos diversos robôs de variados modelos, um deles é o Baset (Baset PAZHUh TEHRAN, 2015) um robô comercial voltado para esta área de futebol, a RoboCup, e a interação humana (figura 8).

Figura 8 – Robô Baset da equipe do Ira campeã da RoboCup 2014.



Fonte: Baset Pazhuh Tehran, 2015.

1.5 Justificativa

Com estes dados de resistência e a melhoria de algumas peças, conseguiremos realizar mais estudos e pesquisas nos robôs, além dos que estão sendo mostrados neste projeto que vai desde a criação de novas peças até o controle de caminhada, pois teríamos um robô com desempenho mecânico melhor devido a sua grande perda de peso. Estes dados são suficientes para um primeiro estudo de resistência das peças, assim análises podem ser feitas sem a necessidade de

³Acrilonitrila butadieno estireno, cuja sigla ABS deriva da forma inglesa acrylonitrile butadiene styrene, é um copolímero composto pela combinação de acrilonitrila, butadieno e estireno. A sua fórmula química é ($C_8H_8\Delta C_4H_6\Delta C_3H_3N$), e a proporção exata de cada componente na composição do copolímero depende da utilização final do produto para que este se destina. O resultado físico deste copolímero é um material termoplástico rígido e leve, com alguma flexibilidade e resistência na absorção de impacto, muito comum na fabricação de produtos moldados para usos diversos. (WIKIPEDIA, 2015a)

produzí-las para comprovar a sua eficiência. Estes dados podem ser usados em todos os projetos futuros, como a construção de um robô humanoide adulto.

2 REGAS ROBOCUP

A principal regra da competição é que os robôs devem obrigatoriamente ter um corpo com fisionomia parecida a de um humano, ou seja, devem constituir de duas pernas, dois braços e uma cabeça, que estão ligados a um tronco. E obrigatoriamente ele deve conseguir ficar em pé sozinho e ter um andar bípede funcionado, todos os movimentos do robô tem que ser cinematicamente equivalentes a de uma pessoa.

2.1 Dimensões

A RoboCup tem algumas restrições com relação as dimensões dos robôs humanoides, dentre elas são:

2.1.1 Área do Pé

A área do pé do robô é determinada pela altura do seu centro de massa com relação ao chão usando a equação (1).

$$\text{Área}_{\text{pé}} \leq \frac{(2.2 \cdot H_{CG})^2}{32} \quad (1)$$

Considerando um retângulo que envolva todo o pé do robô a relação entre o lado maior e o menor não pode exceder a 2,5, como mostrado na equação (2).

$$\frac{\text{Lado maior do retângulo}}{\text{Lado menor do retângulo}} \leq 2,5 \quad (2)$$

2.1.2 Largura do robô

Na posição ereta do robô ele deve caber dentro de um cilindro de diâmetro igual à $0,55 \cdot H_{Máxima}$.

2.1.3 Braços

A soma dos braços do robô e do tronco teve te no máximo $1,2 \cdot H_{Máxima}$ e os braços devem ter o mesmo tamanho.

2.1.4 Máxima extensão

Quando estendido o robô não pode atingir uma altura maior que $1,5 \cdot H_{Máxima}$.

2.1.5 Pernas

A altura máxima da perna tem que respeitar a equação (3).

$$0,35 \cdot H_{Máxima} \leq H_{Pernas} \leq 0,7 \cdot H_{Máxima} \quad (3)$$

2.1.6 Cabeça

A altura máxima da cabeça tem que respeitar a equação (4).

$$0,05 \cdot H_{Máxima} \leq H_{Pernas} \leq 0,25 \cdot H_{Máxima} \quad (4)$$

2.2 Categorias

A RoboCup tem 3 categorias de robôs humanoides, a KidSize, a TeamSize e a AdultSize, cada uma delas tem algumas características particulares que serão apresentadas a seguir:

2.2.1 KidSize

A categoria KidSize tem algumas regras próprias como a limitação de altura máxima, que tem que ficar entre 40 cm e 90 cm, considerando a posição ereta do robô. Durante o jogo caso o robô cai ele deve ser capaz de se levantar sozinho e continuar a jogar. E em todo o momento eles devem estar realizando alguma tarefa, mesmo que seja de apenas procurar a bola em campo.

2.2.2 *TeamSize*

A categoria TeamSize tem algumas regras próprias como a limitação de altura máxima, que tem que ficar entre 80 cm e 140 cm, considerando a posição ereta do robô. Entretanto caso o robô cai ele não precisa levantar sozinho, um integrante da equipe pode levantar ele, porem ele deve retornar pelas laterais do campo. O peso também é medido e tem que ser de no máximo 20 kg.

2.2.3 *AdultSize*

A categoria AdultSize a limitação de altura é de 130 cm e 180 cm, considerando a posição ereta do robô. O peso também é medido e tem que ser de no mínimo 10 kg.

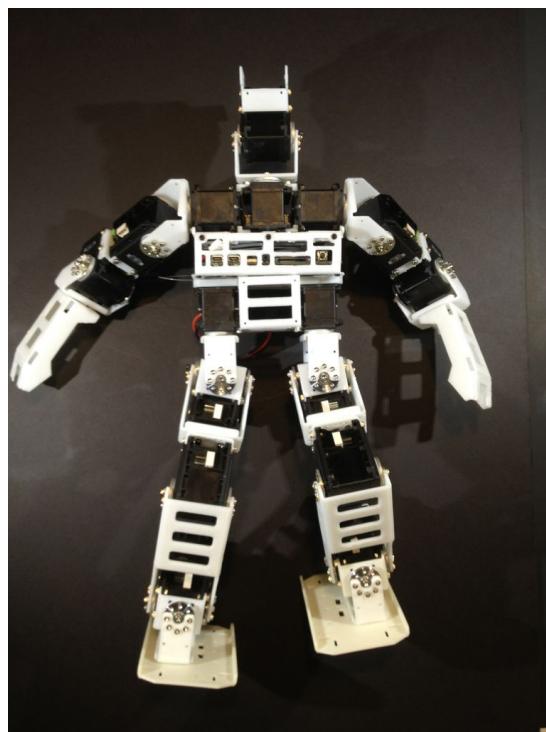
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Robôs Humanoides

3.1.1 Robôs Humanoides da RoboCup

Hoje temos diversas equipes de varias partes do mundo participando da RoboCup, entretanto um dos grandes problemas nesta categoria é que a grande maioria das equipes não se atenta a parte mecânica do robô, antes tem sua preocupação voltada a programação dos robôs, fazendo com que eles fiquem superdimensionados e acaba sobrecarregando os motores fazendo com que sua vida útil seja reduzida. Uma das equipes que se preocupa com este ponto é a equipe do Ira, o Baset, como vemos na figura 8 o Baset tem a grande maioria das peças furadas, elas fazendo com que a ele fique mais leve, esta mesma técnica é aplicada em outros robôs como o DARwIn-OP (WIKIPEDIA, 2015b), um robô open source desenvolvido pelo Virginia Tech, Purdue University,e University of Pennsylvania (figura 9).

Figura 9 – DARwIn-OP sem as capas de proteção para mostrar suas peças.



Fonte: Do-It-Yourself, 2015.

Além disto, grande parte das equipes não usam apenas um tipo de motor, pois motores com mais torque costumam ser usualmente mais caros, portanto, como mostrado na tabela 1 para se ter uma boa relação custo/benefício, motores mais potentes são usados nas pernas, que são as partes que precisam de mais esforço, as demais partes recebem motores com um menor torque.

A principal empresa fornecedora de servosmotores é a Dynamixel (DYNAMIXEL, 2015), esta empresa tem duas categorias principais de servomotores, a RX e a MX. Os motores com a categoria RX usualmente tem um menor torque que os motores da categoria MX, e dentro de cada categoria também se tem uma divisão de torque separada por números. Em geral, quanto maior o número maior o torque que o motor pode fornecer. Por exemplo, o motor RX-28 tem um torque maior que o RX-24, mas não do que o MX-106.

Tabela 1 – Tabela com relação de motores das equipes da RoboCup 2.015

<i>Equipe</i>	<i>Quant. motores por membro</i>					<i>Tipo motores por membro</i>			
	<i>Cabeça</i>	<i>Braço</i>	<i>Perna</i>	<i>Tronco</i>	<i>Total</i>	<i>Cabeça</i>	<i>Braço</i>	<i>Perna</i>	<i>Tronco</i>
AcYut	2	4	6	-	22	RX - 28	RX - 64	MX - 106	-
AUT-UofM	2	3	6	-	20	RX - 28	RX - 64	MX - 106	-
HuroEvolutionTN	2	3	6	1	21	RX - 28	RX - 64	MX - 106	MX - 106*
NimbRo	2	3	6	-	20	RX - 28	RX - 64	MX - 106	-
MU-L8	2	3	6	-	20	MX - 64T	MX - 64T	MX - 106T	-
Parand (Baset)	2	3	6	-	20	MX - 28	MX - 64	MX - 106R	-
Detlef	2	3	6	-	20	MX - 64	MX - 64	MX - 106	-

Fonte: Autor

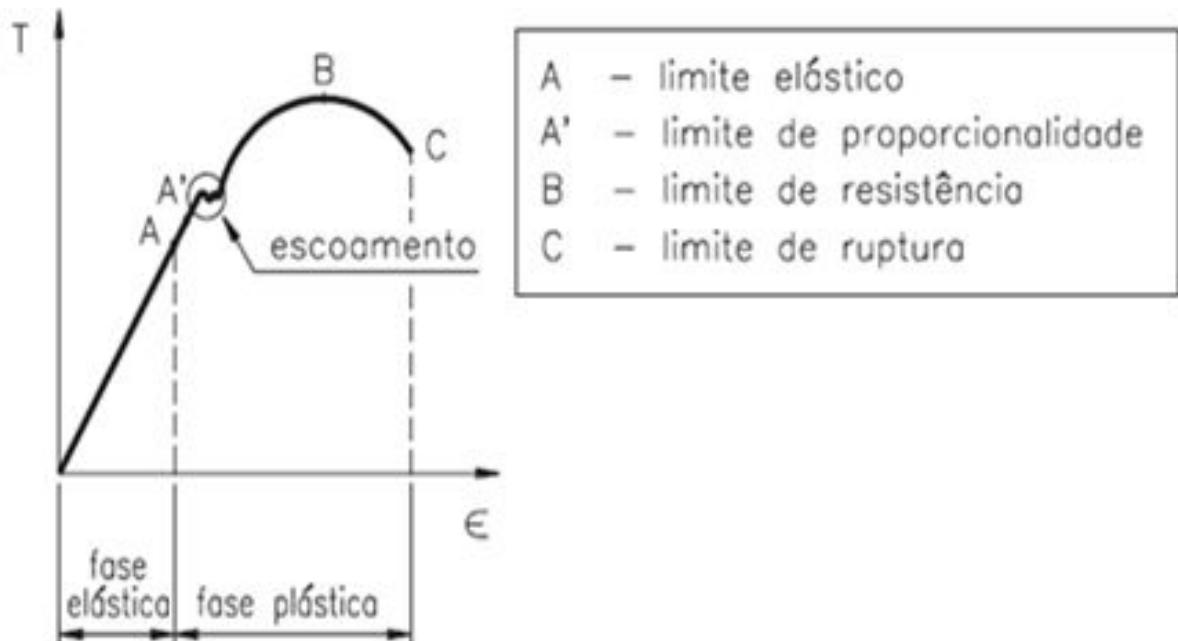
*Não especificado, motor hipotético

3.2 Ensaio de tração

Existem diversos ensaios usados para determinação das propriedades mecânicas de um material, o mais utilizado é o ensaio de tração, devido a sua relativa simplicidade e rapidez na obtenção dos resultados. Este ensaio usa corpos de prova segundo as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e basicamente uma força unidirecional é aplicada gradativamente ao corpo de prova e sua deformação é mediada para que se possam fazer os levantamentos de suas características. O gráfico que deve ser obtido deste ensaio é o de tensão-deformação (figura 10), a tensão referida no gráfico é a tensão convencional ou tensão nominal

(σ_c) é obtida através da equação 5 e a deformação convencional ou nominal (ε_c) é obtida através da equação 6 (AMAURO; SPIM; SANTOS, 2000).

Figura 10 – Curva tensão-deformação.



Fonte: InfoEscola, 2015.

$$\sigma_c = \frac{P}{S_0} \quad (5)$$

Sendo:

σ_c =tensão (Pa);

P=carga aplicada(N);

S_0 =seção transversal original(m^2).

$$\varepsilon_c = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (6)$$

Sendo:

ε_c =deformação (adimensional);

l_0 =comprimento inicial (m);

l =comprimento a carga aplicada P (m).

Na figura 10 pode se observar que existe quatro regiões importantes, a região de comportamento elástico (0-A), região de escoamento (A'), região de escoamento de discordâncias (A-B), região de encruamento não-uniforme (B-C) e a região de Ruptura (C). Para cada uma das regiões é possível se retirar dados importantes que serão mostrados a seguir.

3.2.1 Região de Comportamento Elástico – Regime Elástico

Quando se aplica uma força (ou carga) em um objeto ele sofre uma deformação, após a retirada da força ele volta as suas dimensões iniciais, quando isso ocorre dizemos que ouve uma deformação elástica. Quando isso acontece podemos descrever matematicamente com a equação da elasticidade da mola (7).

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (7)$$

De modo semelhante a equação da mola a deformação elástica obedece a *Lei de Hooke* sendo:

E = Módulo de elasticidade (Pa);

ε = deformação causada por uma força P (adimensional).

Vale ressaltar que, quanto maior o módulo de elasticidade menor é a deformação elástica do corpo de prova. Para metais o módulo fica em torno de 10^5 quanto para polímeros fica em média a 10^2 com exceção de alguns polímeros reforçados que conseguem chegar a 10^4 .

3.2.1.1 Módulo de elasticidade transversal (G)

O módulo de elasticidade transversal é uma particularidade do módulo de elasticidade onde a carga é aplicada em cisalhamento e não em compressão ou tração, uma força bastante comum em estruturas. Para materiais isotrópicos¹ o modulo pode ser calculado como na equação 8.

$$G = \frac{E}{2 * (1 + \nu)} \quad (8)$$

¹Um material é isotrópico se suas propriedades mecânicas são as mesmas em todas direções. Os materiais isotrópicos podem ter uma estrutura microscópica homogênea ou não homogênea. Por exemplo, o aço demonstra comportamento isotrópico, apesar de sua estrutura microscópica ser não homogênea(SOLIDWORKS CORP. - SOLIDWORKS, 2015).

Sendo:

G =Módulo de elasticidade transversal (Pa);

ν =coeficiente de Poisson (adimensional).

3.2.1.2 Coeficiente de Poisson (ν)

O coeficiente de Poisson mede a relação entre a deformação transversal e a deformação longitudinal, que varia dependendo da rigidez do material, portanto ele pode ser determinado pela equação 9:

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \quad (9)$$

Sendo:

ϵ_x = deformação em x (m);

ϵ_y = deformação em y (m);

ϵ_z = deformação em z (m).

Assim sendo, uma força uniaxial aplicada a um corpo, gera uma deformação na mesma direção, e nas outras direções gera uma deformação proporcional, onde são mensuráveis através do coeficiente de Poisson.

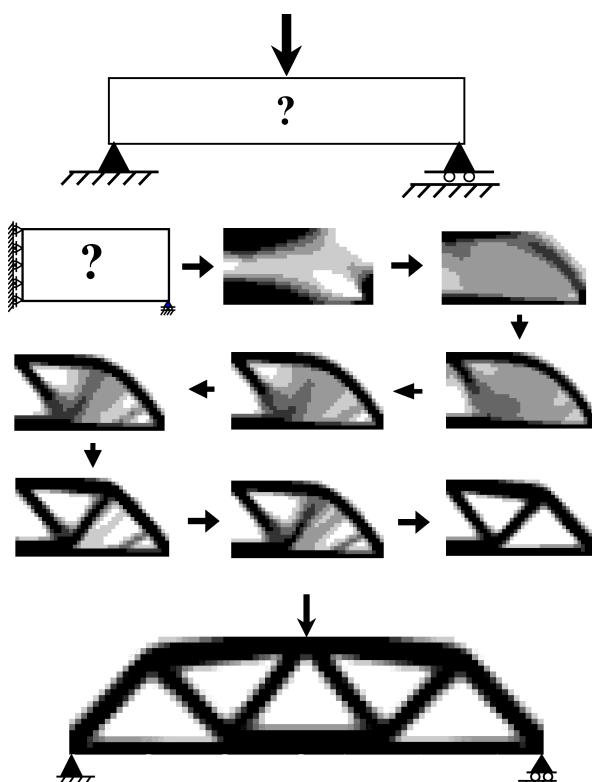
3.3 Optimização topológica

O método otimização topológica (do inglês: TOM) tem como princípio a retirada de material de uma peça com o objetivo de manter a mesma resistência mecânica com menos material e, assim, gerar um custo menor na produção e melhorar o projeto como um todo. A base para seu estudo e melhorias é o método de elementos finitos, pois um dos fatores principais é a necessidade de conhecer as tensões e deformações que a estrutura estará suportando e, para isso, o método dos elementos finitos é utilizado, pois apresenta de forma rápida e clara a resposta da estrutura com diferentes cargas.

Para cada tipo de estrutura e esforço, uma modelagem deve ser levada em consideração, como por exemplo, se a estrutura vai sofrer algum tipo de esforço (continuo, velocidade ou

aceleração) e se a estrutura vai se movimentar (forças iniciais), pois tudo isso deve ser considerado, já que para cada tipo de esforço, uma análise diferente deve ser levada em consideração para que a estrutura não venha a ser mal representada e, assim, gerar problemas futuros.

Figura 11 – Exemplo de otimização de uma estrutura com carregamento simples.



Fonte: (ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO,).

material, faremos ensaios de resistência a fim de obter maior confiabilidade nos materiais que serão utilizados e sua rigidez a todo tipo de esforço.

Através de todas estas ferramentas uma simulação computacional é realizada de maneira rápida e precisa. Mas para isso, algumas condições devem ser levadas em consideração.

3.3.1 Otimização Topológica computacional

Através do desenvolvimento tecnológico, os processos estão sendo executados de forma rápida e precisa, o que torna a otimização topológica computacional uma ferramenta fundamental na grande maioria dos estudos, mas para que esta seja uma ferramenta que auxilie neste

Ao analisar essas tensões e onde elas concentram-se, podemos manipular o material de tal maneira que, mesmo a estrutura tendo menos matérias, consiga resistir às mesmas cargas antes dimensionadas para uma estrutura maciça e, assim, tendo uma melhoria em custo e resistência, pois além de usar menos matéria e ter uma economia considerável, também traz o benefício de leveza ao projeto ao fazer com que suas próprias forças internas sejam reduzidas, como por exemplo, a força inercial.

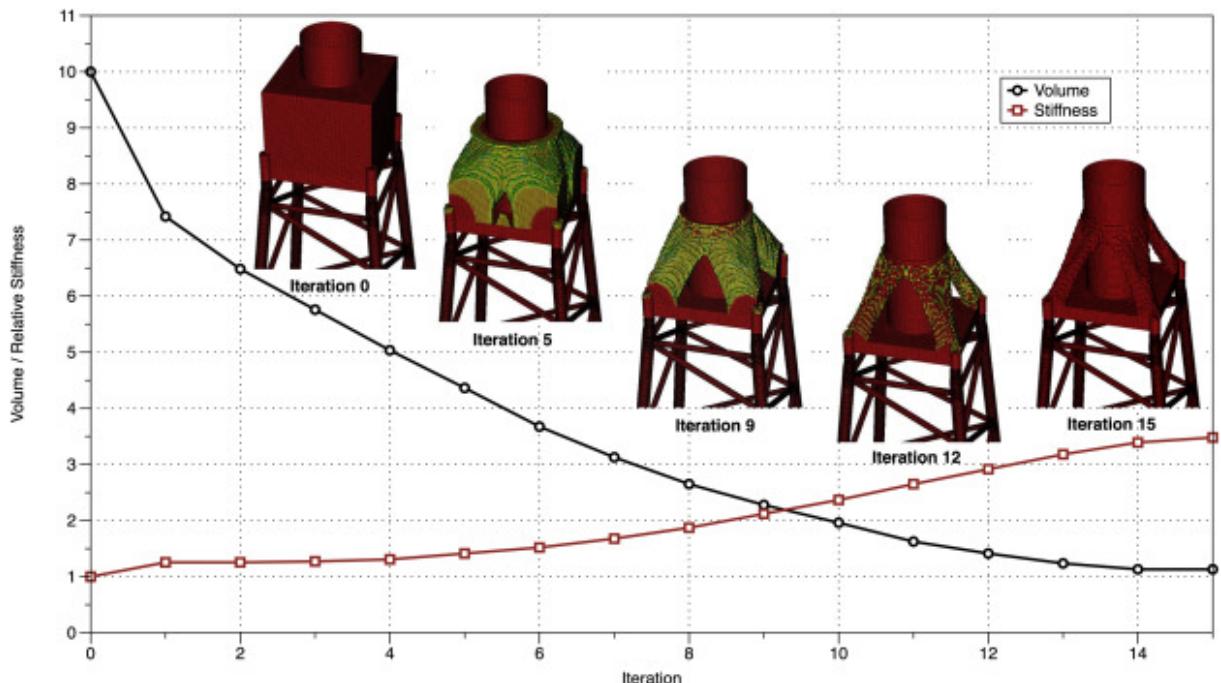
Entretanto, vale a pena afirmar que, além das tensões serem de extrema importância para este estudo, o material também será, pois é através de sua rigidez que podemos dimensionar corretamente a quantidade de material que terá que ser deixado para que não haja problemas de dimensionamento. Para se ter exatidão nas medições da rigidez do mate-

processo, algumas condições devem ser dadas a ela, as quais chamamos de condições de contorno.

Tais condições dependem principalmente da finalidade que terá a estrutura que está sendo estudada. Como no exemplo da figura 6, na qual os suportes foram bem posicionados e a carga bem dimensionada para que assim se pudesse obter uma representação fiel da realidade do projeto.

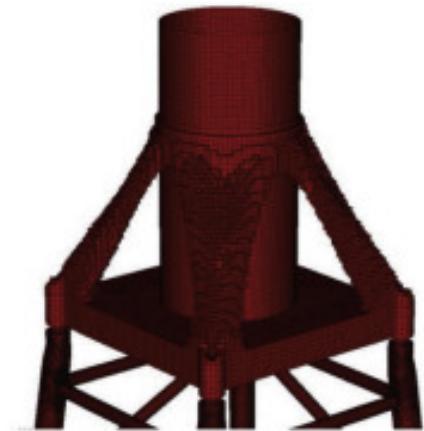
Vemos no artigo de Leea José A. González (2015), um exemplo de otimização, onde a partir de um sólido maciço um aprimoramento foi realizado procurando elementos que estejam com uma tensão baixa para ser retirado, na figura 12. Entretanto após a otimização, normalmente obtemos um material poroso, pois a TOM retira elementos internos da peça que pode gerar problemas, o que normalmente se faz logo em seguida, é aplicar uma técnica de suavização de superfícies a fim de se tirar esses poros e tornar a peça maciça (figura 13).

Figura 12 – Grafico de evolução nas interações da otimização.

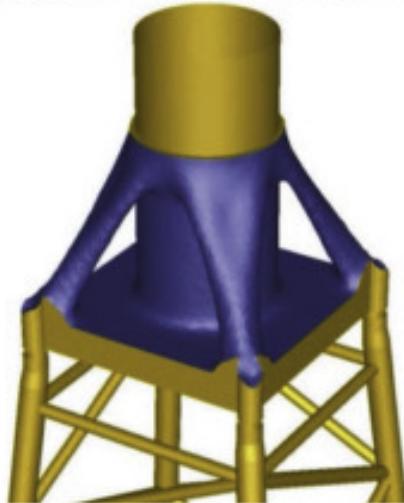


Fonte: Leea José A. González, 2015.

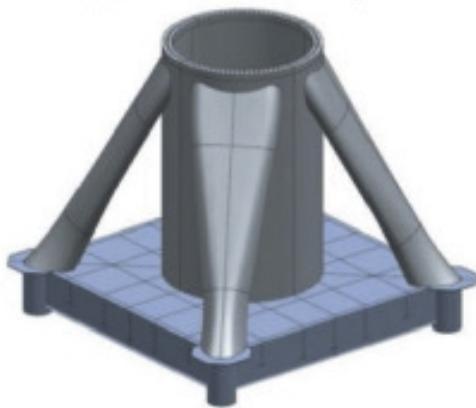
Figura 13 – Suavizando a peça.



(a) Result from topology optimization.



(b) Smoothed shape.



(c) Final shell design.

Fonte: Leea José A. González, 2015.

Com a peça gerada pela TOM, pegamos seu contorno (face externa) e vamos extrudando para o seu centro fazendo com que o interior da peça volte a ter material. Esta técnica só é importante pois quando gerar a peça para a impressão, ela pode ser gerada com essas porosidade e assim prejudicar sua criação e fazendo com que ela se torne mais frágil.

Feito isso um segundo problema costuma acontecer, que é as peças terem muitos cantos vivos ou ter uma retirada de material que é muito difícil de se fazer na prática, quando isso acontece usamos uma ferramenta de suavização de bordas onde pegamos os cantos vivos e o arredondamos ou prolongamos, a fim de se eliminar os cantos vivos e pontos onde a espessura é muito pequena.

3.3.1.1 Carga variável

Entretanto na grande maioria das situações a carga varia com o tempo, com tudo ainda podemos usar a otimização, para isso realizam-se diversas interações com cargas distintas, regiões em comum são retiradas e uma nova interação é realizada. Esta mesma técnica pode ser aplicada pelo *toolbox* Vitual.Pyxis (PYXIS, 2015), este *toolbox* é usado no software de simulação Ansys (ANSYS, 2015)², com Vitual.Pyxis colocamos as cargas variadas na peça com algumas restrições de movimentos

²ANSYS, Inc. é um desenvolvedor de programas de simulação para engenharia (engenharia assistida por computador, ou CAE) sediado em Canonsburg, Pensilvânia, Estados Unidos. A companhia foi fundada em 1970 por John A. Swanson, e denominada originalmente Swanson Analysis Systems, Inc.

a peça e como resultado obtemos uma otimização para esta carga variada.

4 PROJETO

Inicialmente ensaio de tração foi realizada para se obter as características físicas do material, isto é, as propriedades mecânicas como módulo de elasticidade e o gráfico de tensão/deformação do material a fim de se conseguir uma análise mais fiel das peças feitas nas impressoras 3D, com os dados obtidos foram analisados para se determinar as características e colocar esses dados no software ANSYS para uma análise de otimização topológica. Para provar a eficiência da técnica, algumas peças já foram desenhadas e testadas nos robôs existentes. Os experimentos são mostrados em detalhe a seguir.

4.1 Ensaios de tração

Para que conseguiremos determinar a resistência do material foi realizado um ensaio com 13 corpos de prova com diferentes densidades no corpo, sendo divididos da seguinte forma:

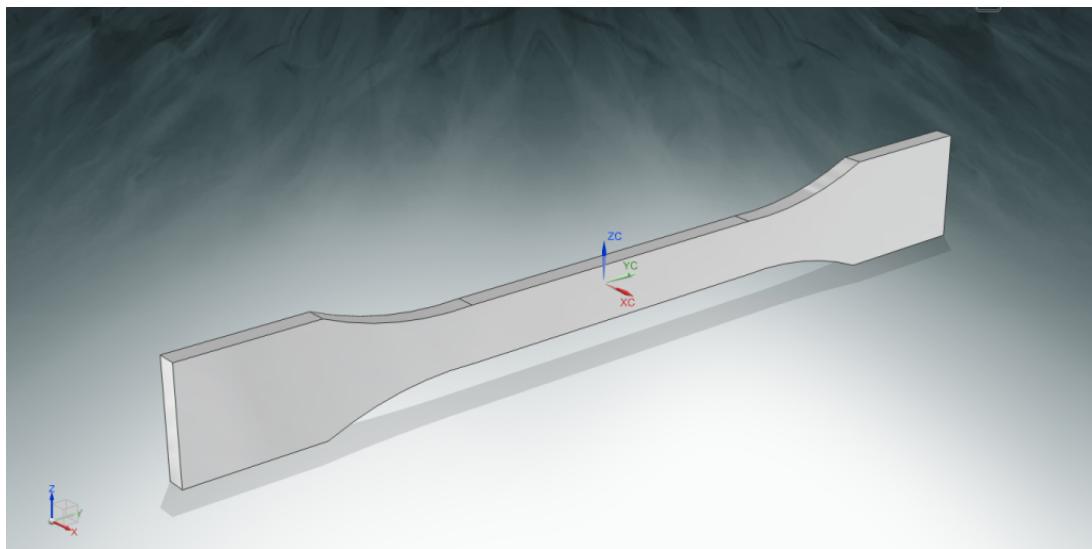
Tabela 2 – Corpos de provas.

<i>Densidade (%)</i>	<i>Quant.</i>
30	4
60	4
80	4
100	1

Fonte: Autor.

As dimensões do corpo de prova foram tiradas da Norma NBR 9622/1986, norma referente a ensaios de poliméricos. Para isso fosse possível um desenho em 3D do corpo de prova feito no NX seguindo as Normas da ABNT (figura 14)

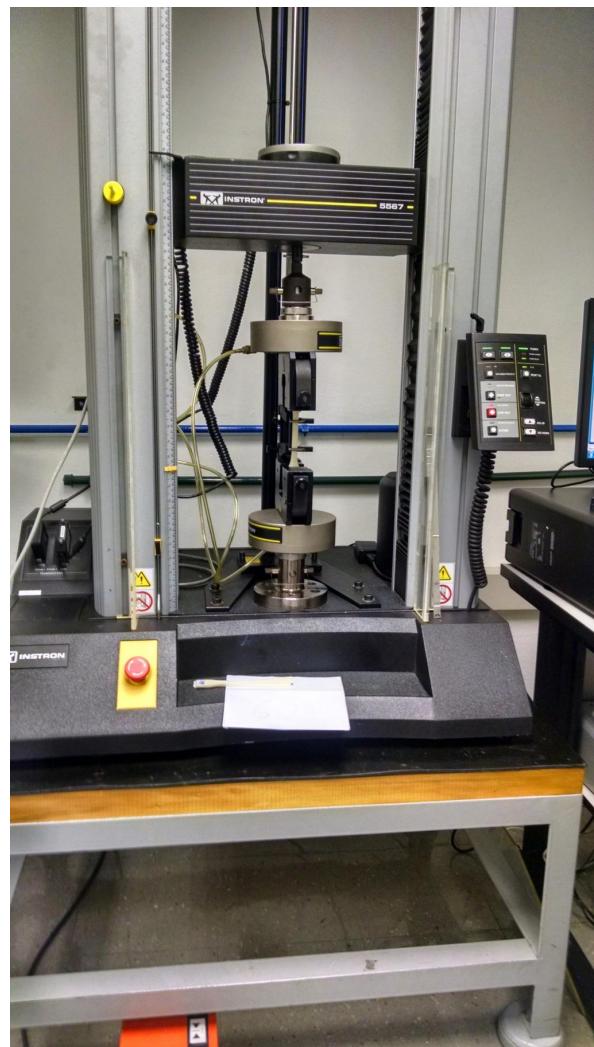
Figura 14 – Corpo de Prova.



Fonte: Autor.

Para os paramentos de impressão (como temperatura do extrusor, mesa, etc.) foram todos deixados no padrão da impressora apenas variando a densidade. Após a impressão dos objetos os corpos tiveram um período de 24 horas de repouso como mandado pela norma. Após as 24 horas os ensaios tiveram início na máquina Instron 5567(INSTRON BRASIL, 2015).

Figura 15 – Instron 5567.

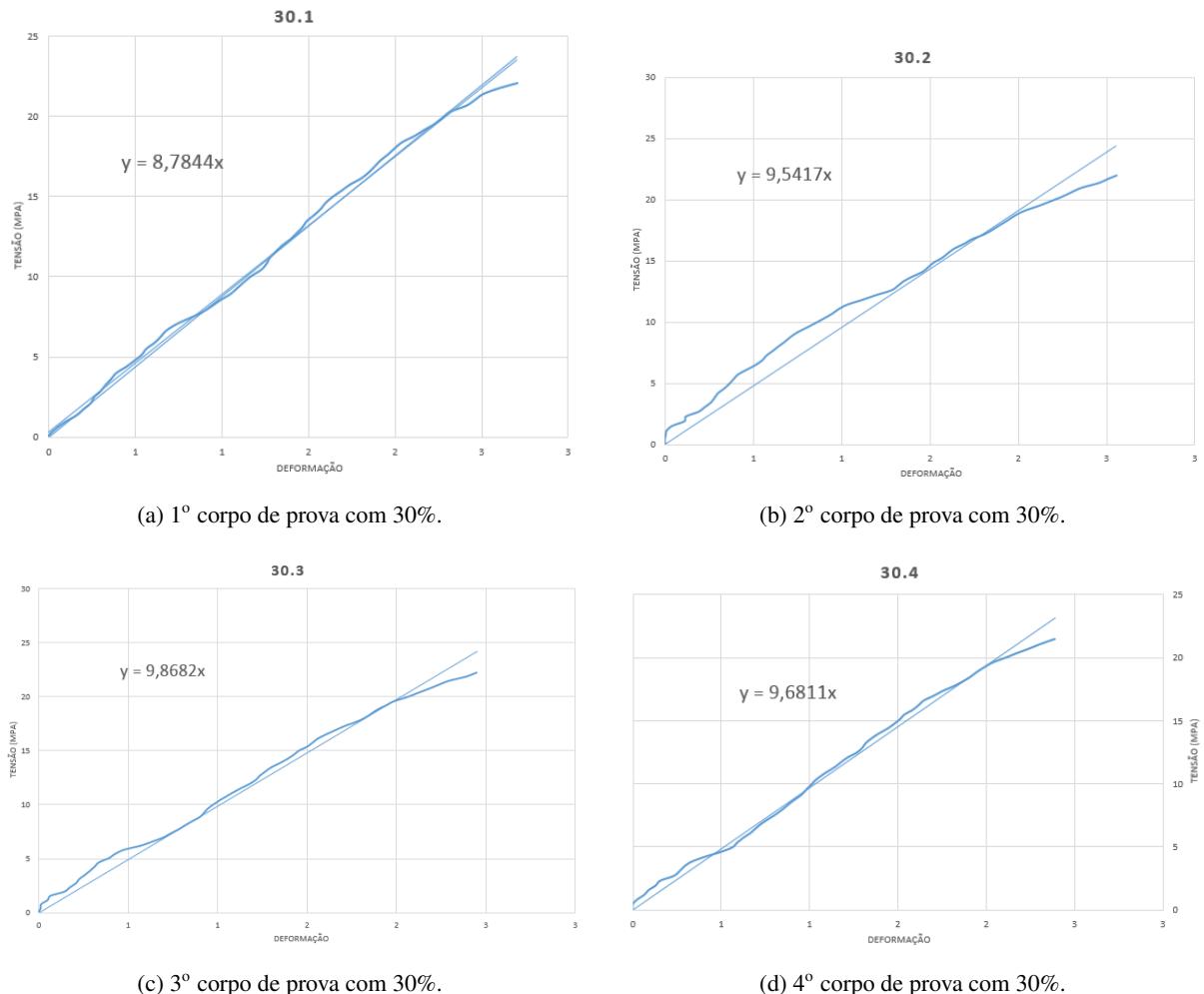


Fonte: Autor.

4.1.1 Resultados

Após a curva tensão-deformação foram levantadas para todo os corpos, tendo como resultado os seguintes gráficos:

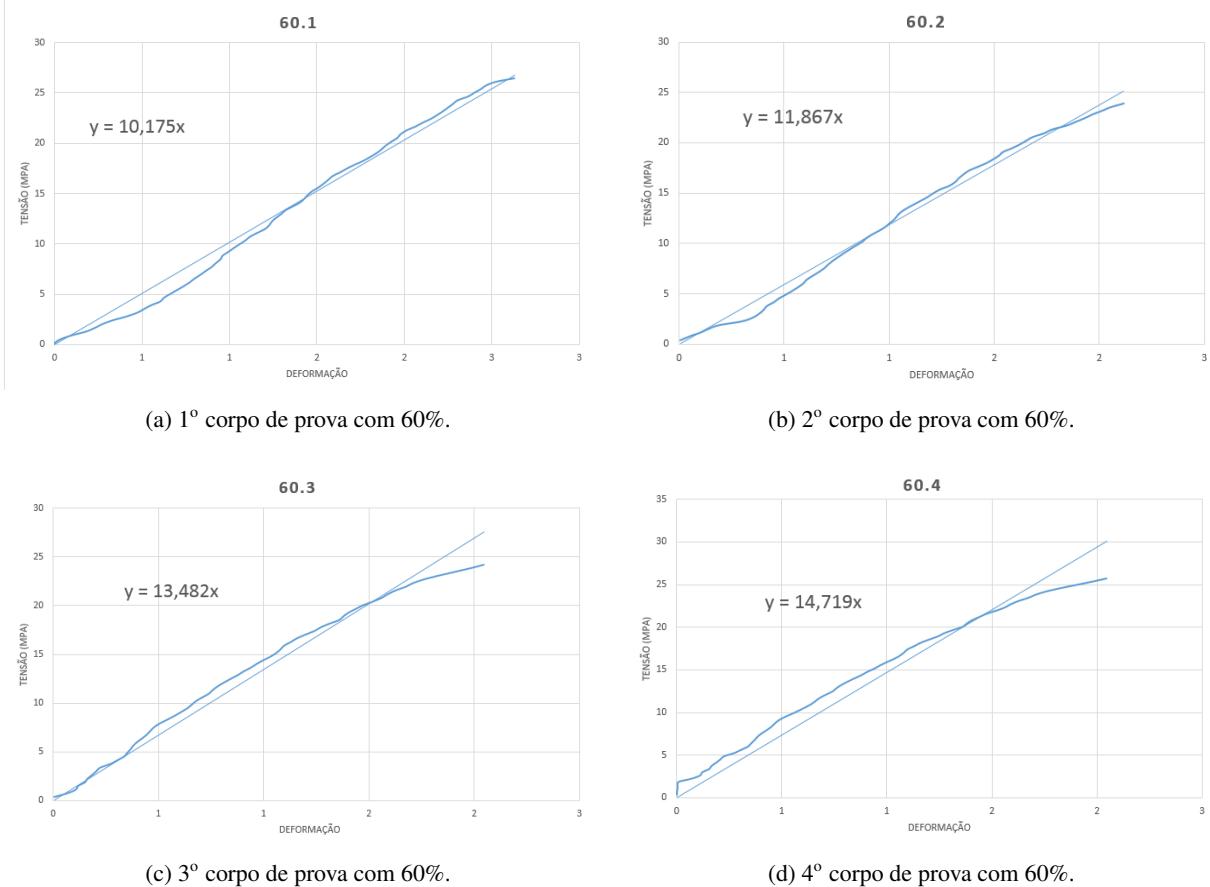
Figura 16 – Gráficos para os corpos de 30%.



Fonte: Autor.

Este é o gráfico de tensão/deformação para cada amostra de 30% de densidade, neles são mostrados apenas a reta de deformação elástica, esta é a região que sempre vamos trabalhar para desenvolver as peças para o robô, para cada amostra a inclinação da reta foi extraída.

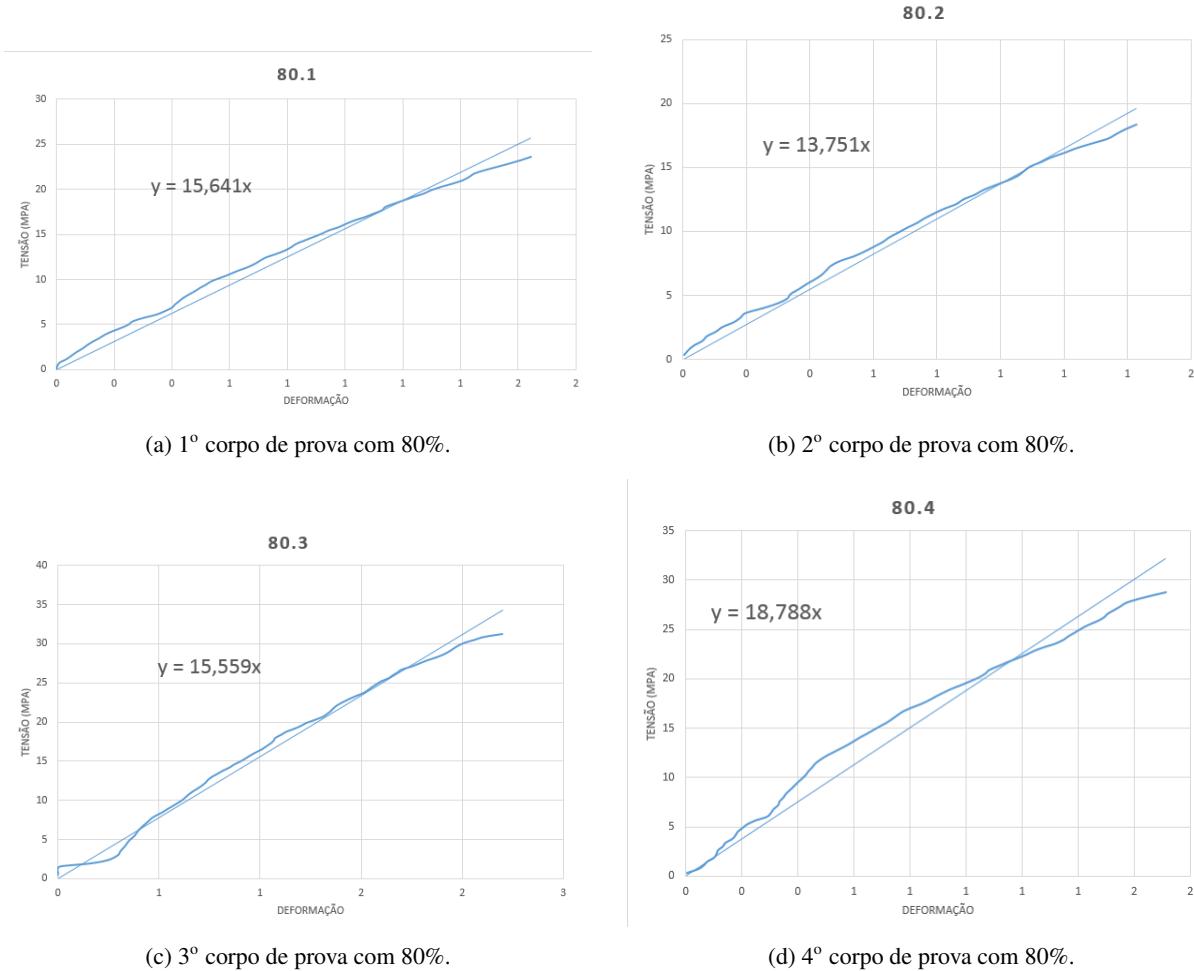
Figura 17 – Gráficos para os corpos de 60%.



Fonte: Autor.

Este é o gráfico de tensão/deformação para cada amostra de 60% de densidade, vale notar que a resistência dele é maior se comparado com os anteriores.

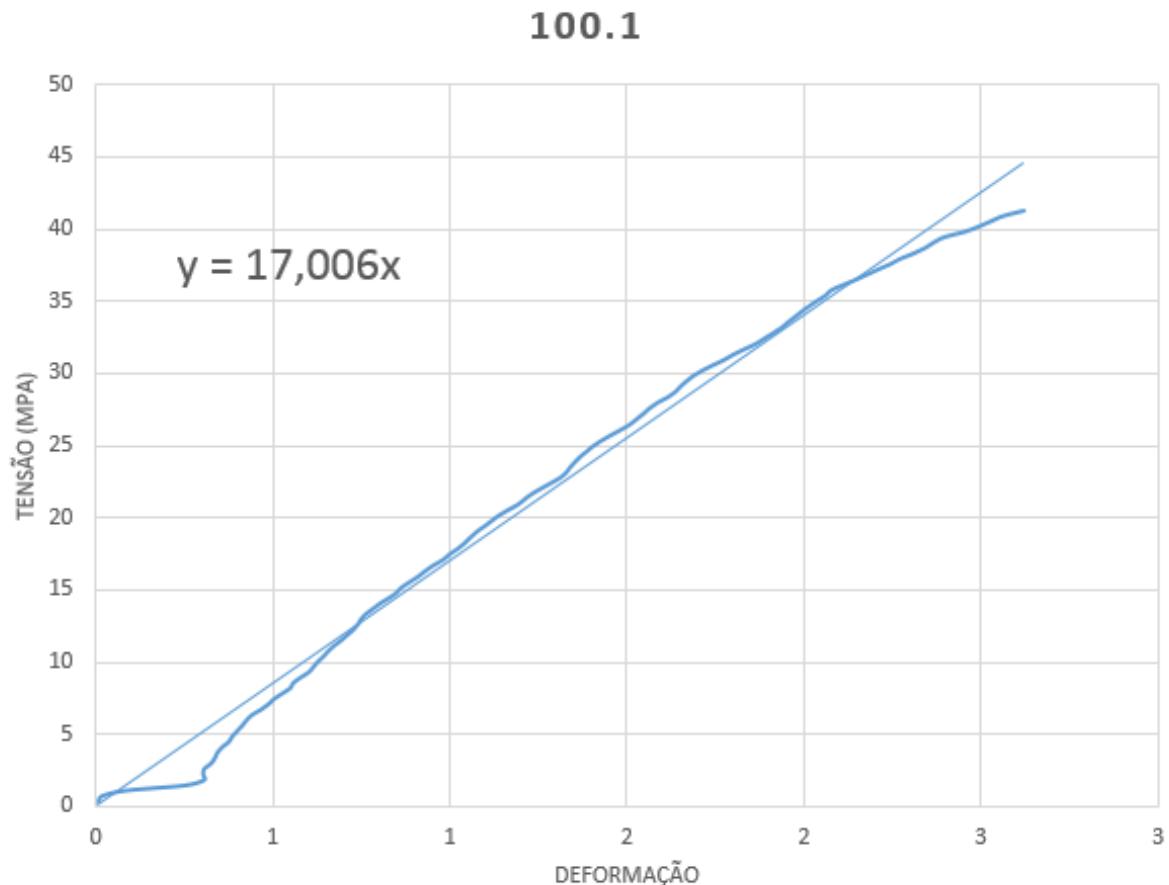
Figura 18 – Gráficos para os corpos de 80%.



Fonte: Autor.

Este é o gráfico de tensão/deformação para cada amostra de 80% de densidade. A resistência dele é maior se comparado com os de 30% e 60%.

Figura 19 – Corpo de prova com 100%.

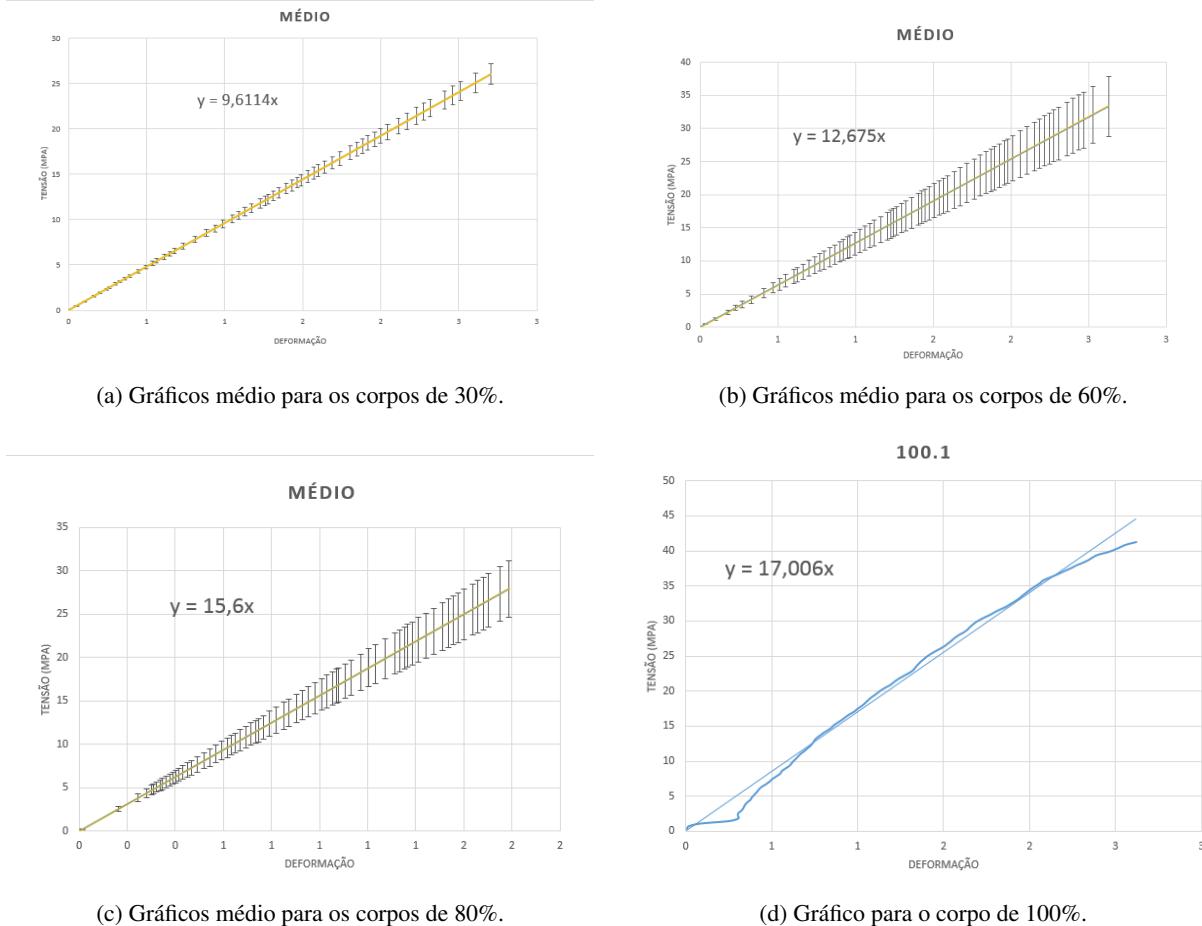


Fonte: Autor.

Não foi possível fazer mais corpos de prova com uma densidade de 100% pois não conseguimos obter mais material para a extrusão.

Após os ensaios a média entre os gráficos foram tirados para que se pudesse estipular o E para cada uma das densidades. Como respostas obtiveram os seguintes gráficos:

Figura 20 – Gráficos médio para os corpos.



Fonte: Autor.

Assim determinado o E para cada densidade eles foram adicionados a biblioteca do software ANSYS para assim poder ser analisadas as peças para o robô JAX¹ e suas peças que também foram desenhadas, entretanto a densidade de 100% vai ser ignorado pois com apenas um único corpo não se pode tirar a media para o E .

4.2 Desenhos

O JAX foi projetado para participar de duas categorias da RoboCup, a KidSize e a TeamSize, para isso ele foi projetado com 85 cm de altura, como base para modelagem usamos o Milton (CORTEZ; BIANCHI, 2011), com exceção de algumas posições dos motores que foram repositionadas para que pudesse ter um controle mais fácil, e as peças foram projetadas a fim de termos uma montagem e desmontagem rápida, como visto no robô Baset, o que facilita

¹Jack android X: “Jack” nome escolhido, “androide” termo usado para determinação de um robô com fisionomia humana e X em representação do numero 10 em algarismos romanos simbolizando o artilheiro

na manutenção e no dinamismo da competição, quando se necessita fazer uma troca rápida de sensores e baterias.

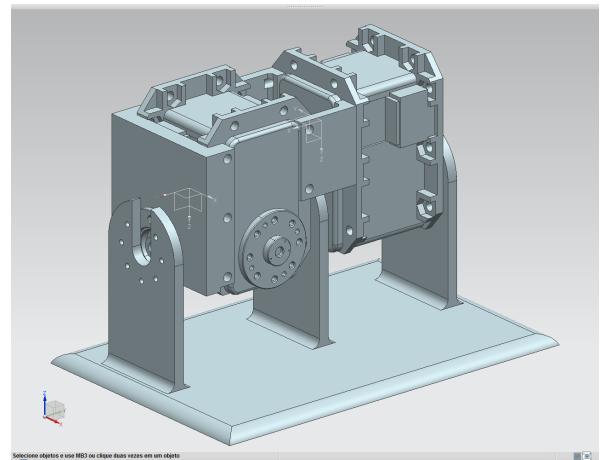
4.2.1 Calcanhar

Uma das suas desvantagens era o calcanhar, por ele não ter os eixos dos motores concêntricos (mostrado na figura 21a) o seu controle se torna difícil de modelar e sendo assim foi projetado um novo estilo de montagem para que se possam ser concêntricos como mostra na figura 21b.

Figura 21 – Diferenças dos calcanhares.



(a) Calcanhar robô Milton.



(b) Desenho calcanhar.

Fonte: Autor.

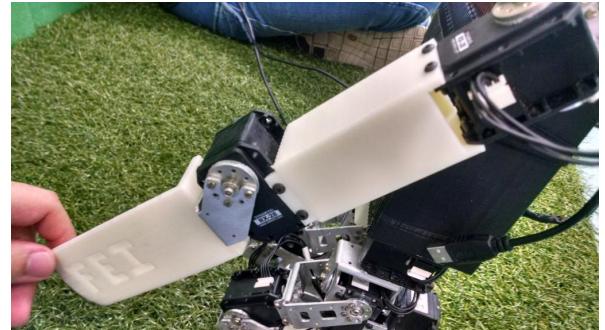
4.2.2 Braços

Outra mudança realizada foi feita para o braço do robô, as distâncias dos eixos dos braços não eram iguais (mostrada na figura 22a), entretanto pelas observações realizadas e testes feitos se notou que um braço com eixos equidistantes (o que já é comum para um humanoide) é mais vantajoso pois ajuda para o levantar e o equilíbrio do humanoide. Por isso as mudanças nos braços foram realizadas como mostrado na figura 22b.

Figura 22 – Desenho braço.



(a) Braço robô Milton.



(b) Peito robô Milton.

Fonte: Autor.

4.2.3 Peito

Uma das principais alterações realizadas foi a feita no peito, no antigo projeto (figura 24) o peito suportava o NUC² na horizontal, hoje ele carrega a NUC na vertical o que ajudou no centro de massa e consequentemente na estabilidade como mostra a figura 23b.

²O NUC (Next Unit of Computing) é o super computador portátil da Intel (INTEL NUC, 2015).

Figura 23 – Diferenças dos peitos.



(a) Peito robô Milton.



(b) Protótipo peito.

Fonte: Autor.

Entretanto com a chegada recente dos novos NUC faz com que uma nova peça seja projetada para que possa ser colocado de forma a não interferir no centro de massa e equilíbrio.

Figura 24 – Novo NUC.



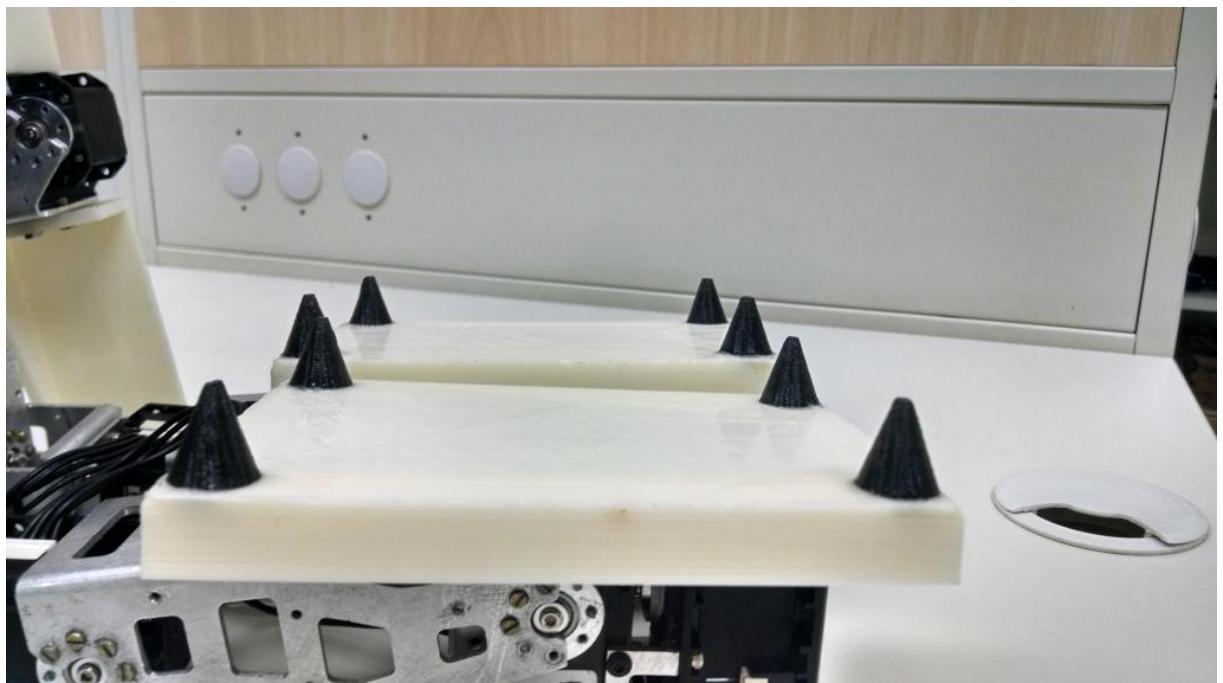
Fonte: Autor.

Utilizamos o NUC, que é um computador fabricado pela Intel, como central de processamento do robô. Todas as informações de sensores e câmera são processados nele e transmitidos para os motores. O NUC utilizado é um i5 com 8 Gigas de memória e um HD SATA de 120 Gigas.

4.2.4 Cravos

Uma mudança das regras (ROBOCUP, 2015) obriga que os robôs consigam andar em uma grama artificial de 30 mm e para isso foi necessário a colocação de cravos nos pés do robô, com a finalidade de se ter mais aderência e estabilidade na hora de andar, chutar, etc. Com isso conseguimos fazer um teste de resistência, para mostrar que os cravos feitos na impressora tem a resistência necessária para sustentar o peso do robô. Agora a resistência do cravo pode ser testada antes de se prototipar as peças.

Figura 25 – Cravos nos pés.



Fonte: Autor.

4.3 Simulações

4.3.1 Carga nos motores

Para se determinar qual motor usar foi estimado o peso total do robô através do volume de cada peça, obtido pelos desenhos feito no NX, multiplicado pelo peso específico do material de fabricação, neste caso o ABS e o alumínio estimamos o peso da peça, somado com o peso do NUC e motores, o peso total foi estimado em 9kg , este peso leva em consideração o robô inteiro sem ser feita o TOM nas peças, assim fazendo que seu peso já esteja superdimensionado.

Com experiencias que temos em robôs anteriores como o Milton, vemos que o motor que mais sofre esforço com o torque é o joelho, com isso colocamos todo o peso do motor em 1 perna do joelho e aplicamos 10kg na sua perna (tentando levar em conta a força inercial que vai ser necessária para tirar o robô do regime), feito isso se notou que o motor precisaria exercer forca de $9,128\text{N.m}$ valor esse já preocupante visto que o motor MX-106T (ROBOTIS - DYNAMIXEL, 2015) pode exercer um torque máximo de 10N.m .

Como para se estimar o peso foi usado a peça sem otimização o seu peso deve se reduzir fazendo com que se torne viável a compra deste motor, como visto em outros modelos da RoboCup, para se saber o quanto se pode tirar de material tem que ser feito o TOM.

4.3.2 Otimização topológica simples

Para se fazer as simulações do robô algumas simplificações tiveram que ser realizadas, apenas as partes críticas foram analisadas, a principal parte que sofre esforço no robô são as pernas, porque é aonde o robô suporta todo o seu peso. Por isso o principal foco da simulação são as pernas do robô que foram simuladas para três condições criticas.

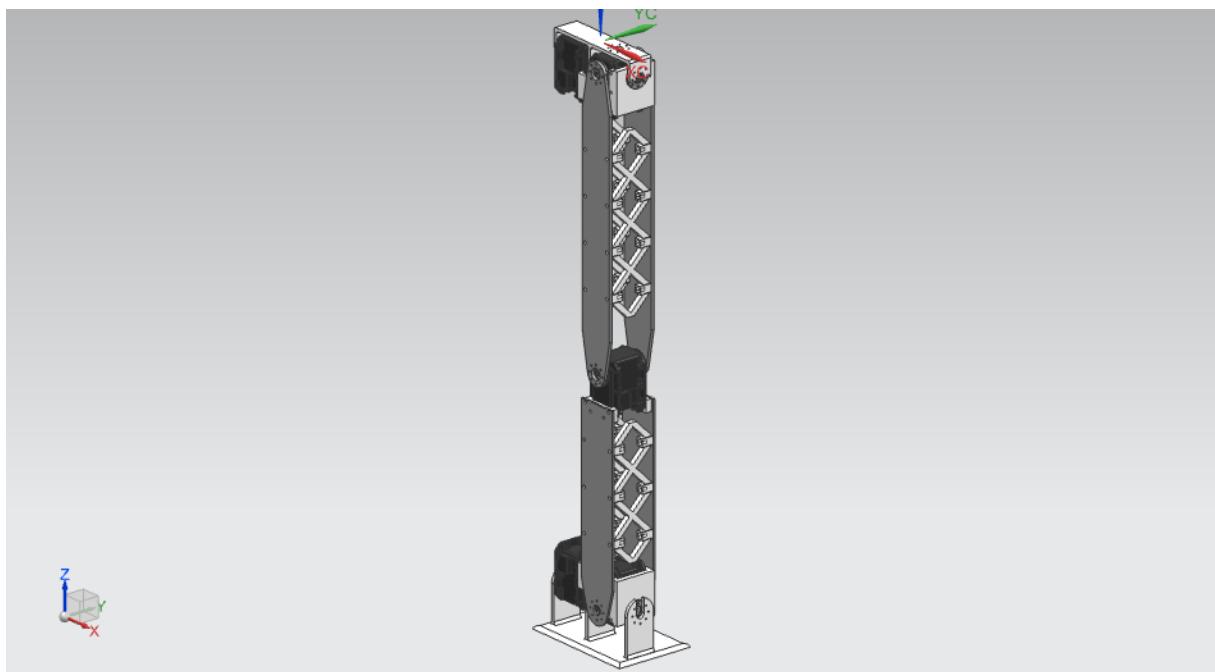
Robô ereto: O robô está com as duas pernas completamente estendidas fazendo seu peso ser dividido igualmente para as duas pernas;

Robô caído: O robô está se levantando e suas pernas tem que suportar alem do próprio peso a força gerada pela inercia do robô quando vai se levantar;

Pernas flexionadas: O robô está prestes a andar, ou fazer algum movimento relacionado a locomoção ele flexiona as pernas para iniciar o movimento que chamamos de *gait*, a análise que foi feita é no momento em que o robô está com apenas umas das pernas de apoio.

Para que essas análises sejam feitas a perna direita do robô foi montada no NX (figura 26) e levando em consideração o material de cada peça e cada que será uma mescla de ABS e alumínio.

Figura 26 – Montagem da perna a ser simulada.



Fonte: Autor.

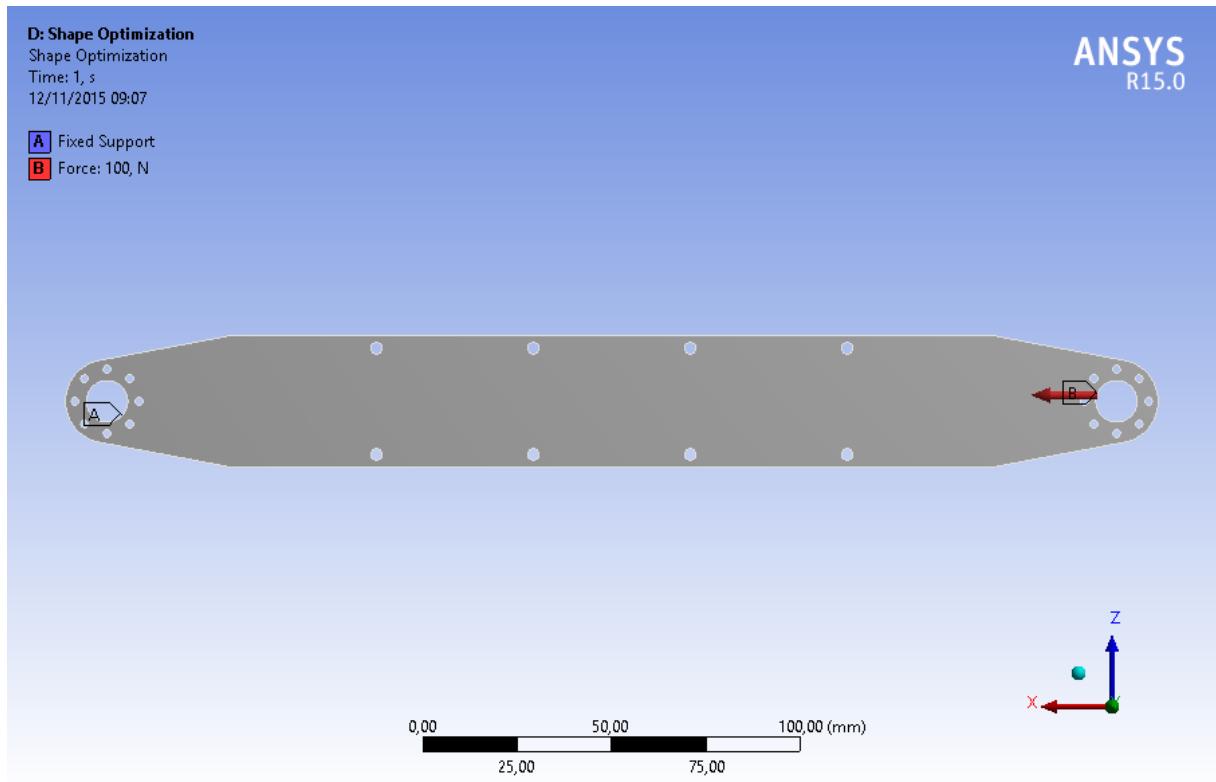
Como pode ser visto na montagem já foram posicionados os motores a fim de que a distância deles já seja levada em consideração o seu peso também. As peças que estão em cinza serão analisadas como chapas de alumínios e as peças que estão em branco serão peças prototipadas na impressora 3D com a densidade de 80%. Após isso a montagem foi exportada para o software ANSYS e juntos com os dados obtidos com os ensaios de tração. Após a inserção das propriedades mecânicas de todos os materiais a modelagem das juntas foram feitas.

4.3.2.1 Ereto

Para o robô ereto, o esforço foi modelado como mostrado na figura 27, apoios em azul são fixos (ou apoios estáticos), e os apoios em vermelho são as cargas que estão sendo aplicadas nele. Nesta posição o robô está ereto e seu peso é dividido entre as duas pernas, entretanto há momentos em que o robô pode ficar apoiado em uma perna, como regra da RoboCup o robô

pode ter no máximo 10 kg, então este foi o peso colocado na simulação mostrado na figura 27.

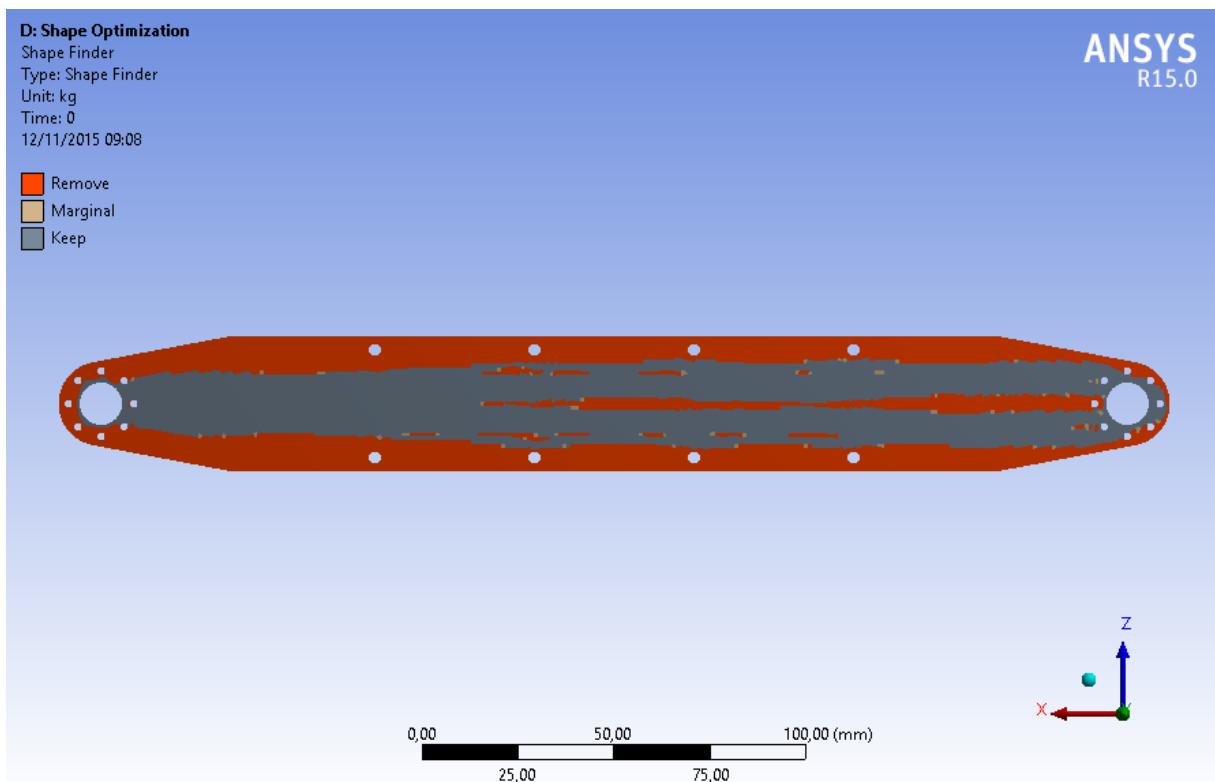
Figura 27 – Posicionado apoios e juntas para as simulações do robô ereto.



Fonte: Autor.

Para este esforço aplicamos TOM nesta peça e como resultado obtivemos a peça mostrada na figura 28.

Figura 28 – Material retirado para as simulações do robô ereto.



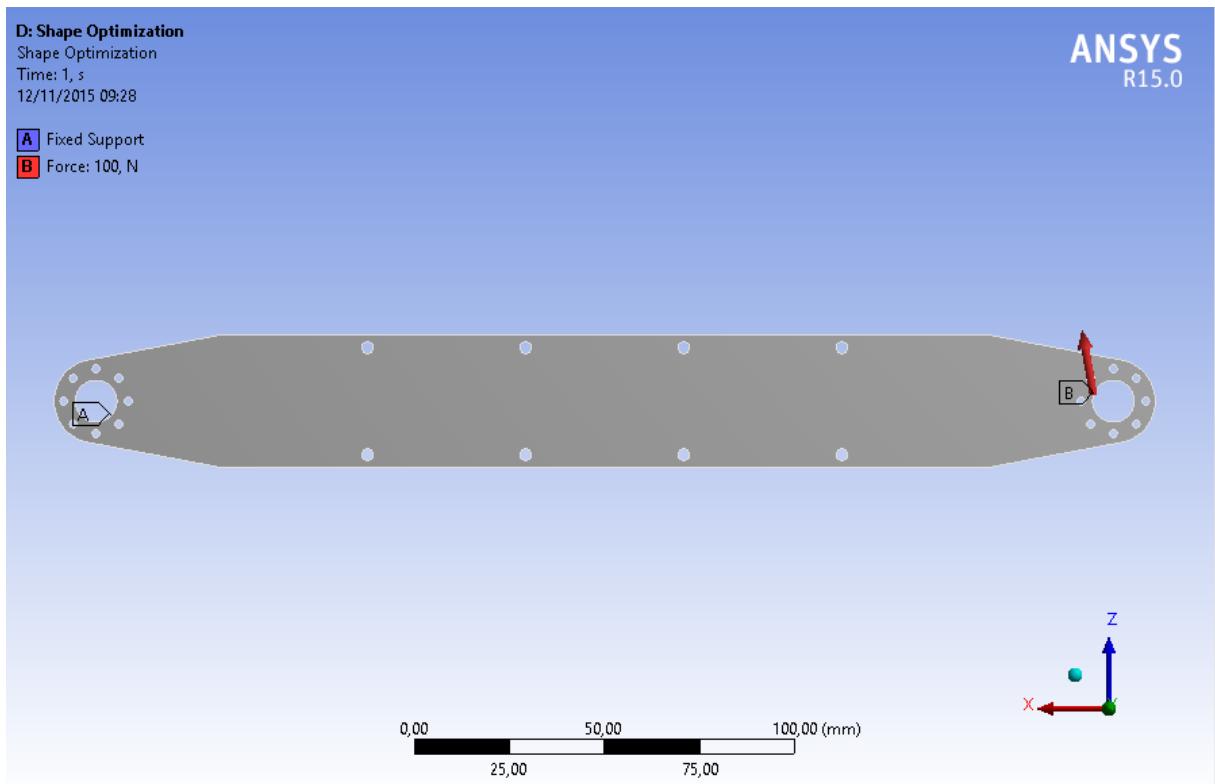
Fonte: Autor.

As partes que estão em vermelho são partes que tem potencial para ser retirada sem afetar seu esforço.

4.3.2.2 Pernas flexionadas

Para o robô com as pernas flexionadas o esforço foi modelado como mostrado na figura 29.

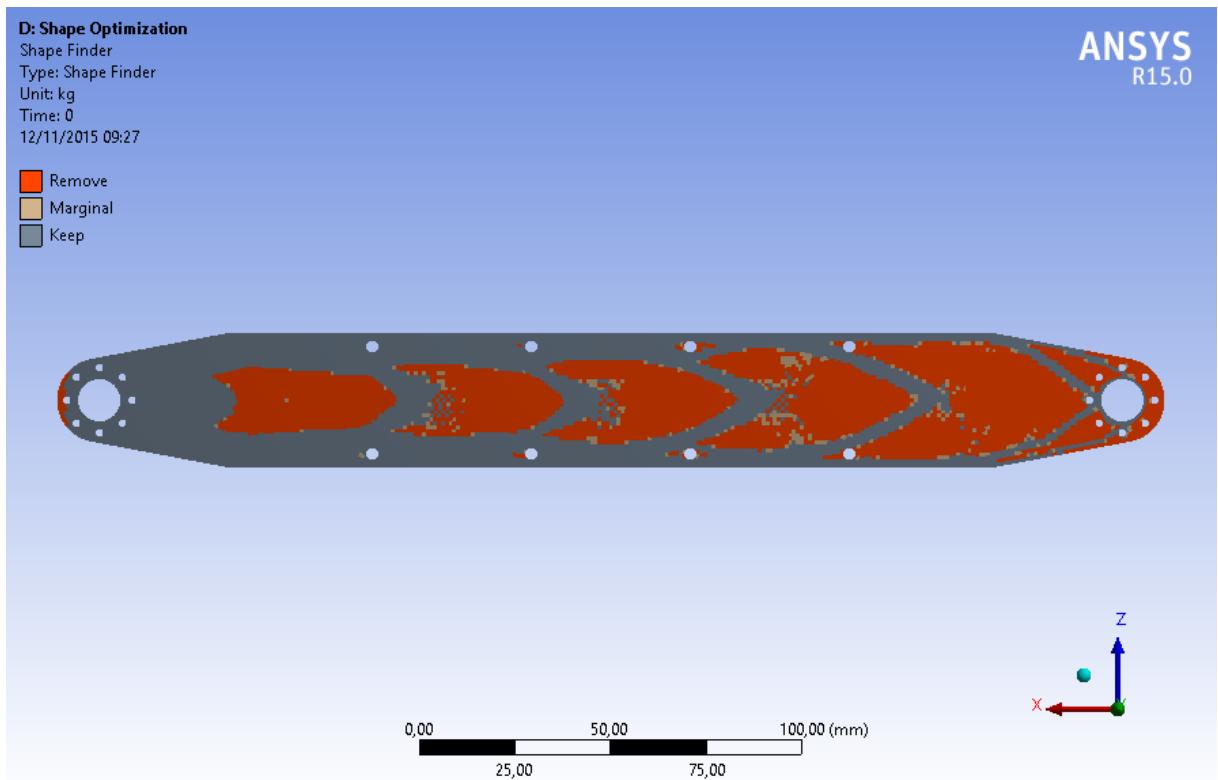
Figura 29 – Posicionado apoios e juntas para as simulações do com as pernas flexionadas.



Fonte: Autor.

Para este esforço aplicamos TOM nesta peça e como resultado obtivemos a peça mostrada na figura 30.

Figura 30 – Material retirado para as simulações do com as penas flexionadas.



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

O projeto teve como foco principal o aperfeiçoamento e a melhora dos robôs humanoides da equipe da FEI. Hoje com ajuda das impressoras 3D foi possível produzir algumas peças secundárias para os robôs e o refinamento de outras partes para melhorar o seu desempenho. Algumas peças do robô foram remodeladas para ajudar no controle, e estudo de esforços foram feitos com o intuito de uma possível aplicação do TOM em algumas partes. Para tanto se fez um ensaio de tração que foi realizado a fim de obter as características do material, neste caso o ABS.

Mesmo não sendo o objetivo principal desta iniciação o projeto os corpos de prova feitos para o ensaio foram protótipos na impressora 3D e para que eles pudessem ser feitos com uma certa qualidade alguns testes foram feitos de temperatura de impressão, velocidade do extrusor e alguns outros fatores, esses dados foram pesquisados em alguns fóruns sobre impressão e o próprio manual da impressora 3D. Com os corpos de prova prontos o ensaio de tração foi realizado e alguns dados do material foram retirados para uma análise de esforços das peças desenhadas. Estes dados foram inseridos no ANSYS juntamente com as peças para se ter uma noção da resistência das peças, e também permitiu uma primeira análise sobre o TOM.

Com os dados obtidos dos ensaios de tração se torna possível fazer análises mais realistas com peças feitas pela impressora 3D, com isso peças que antes só seriam testadas sendo protótipadas agora pode ser feita uma análise de esforços e conseguir estimar sua fadiga e quebras, estes dados já mostraram eficiência pois partes já foram testadas no software e protótipadas, com isso comprovamos a eficácia do ensaio e a importância que ele teve no projeto. O TOM se demonstrou muito eficiente para otimizar as peças do robô, conseguimos tirar aproximadamente 50% do peso de cada peça, isso para uma força fixa, com isso conseguimos comprovar que é possível aplicar o TOM no robô fazendo com que ele tenha uma perda considerável de massa e assim um desempenho melhor.

Para que se torne ainda mais confiável estes dados obtidos no ensaio, se recomenda fazer mais ensaios com diferentes densidades a fim de se levantar uma relação de densidade e resistência (Modulo de elasticidade) mais precisa e até realizar novos ensaios como os de fadiga e torção, para aumentar ainda mais confiabilidade das análises. Para as peças desenhadas para o JAX estão sem uma aplicação eficiente de TOM, a necessidade de uma análise mais abrangente, uma otimização essa que pode ser feita através do Virtual.Pyxis pois as montagens do robô já estão prontas no ANSYS e o estudo das forças para determinar seus máximos e mínimos

também, valores estes que serve de entrada para o Virtual.Pyxis, entretanto este *toolbox* é pago, e por isso a análise completa não pode ser feita neste momento, mas que pode ser realizado em futuras iniciações.

REFERÊNCIAS

- 33RD SQUARE. *Androids Among Us - Our Top Ten Humanoid Robots*. 2015. Disponível em: <<http://www.33rdsquare.com/2011/12/androids-among-us-our-top-ten-humanoid.html>>.
- AMAURI, G.; SPIM, J.; SANTOS, C. **Ensaio dos materiais**. 1. ed. [S.l.]: Ed LTC, 2000.
- ANSYS. **Ansys**. 2015. Disponível em: <www.ansys.com>.
- BASET PAZHUUH TEHRAN. **Robô Baset**. 2015. Disponível em: <<http://robot.basetp.com/>>.
- BLOG DA FEI. **FEI é pentacampeã nacional de futebol de robôs na 12ª Competição Brasileira de Robótica**. 2015. Disponível em: <<http://www.blogafei.com.br/infofei/fei-e-pentacampea-nacional-de-futebol-de-robos-na-12a-competicao-brasileira-de-robotica/#Vm637q8rLQo>>.
- COMPULAB. **fit-PC2i**. 2015. Disponível em: <<http://www.fit-pc.com/web/products/fit-pc2/>>.
- CORTEZ, M. P.; BIANCHI, R. A. C. Construção de um robô humanoide para humanoid league - futebol de robôs. In: **1º Simpósio de Iniciação Científica da FEI (SICFEI), São Bernardo do Campo**. [S.l.: s.n.], 2011.
- DO-IT-YOURSELF. **Robot Cloning by DIY 3d printers!** 2015. Disponível em: <<http://www.diyourslef.ru/technology/robot-cloning-by-diy-3d-printers-do-it-yourself.html>>.
- DYNAMIXEL. **Robois - Dynamixel**. 2015. Disponível em: <http://www.robotis.com/xe/dynamixel_en>.
- ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Exemplos de Otimização de Projetos**. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr5215/exemplos.html>>.
- HONDA MOTORS. **ASIMO**. 2015. Disponível em: <<http://world.honda.com/ASIMO/technology/2011/index.html>>.
- INFOESCOLA. **Ensaio de Tração**. 2015. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/fisica/ensaio-de-tracao/>>.
- INSTRON BRASIL. **Máquinas de teste de materiais**. 2015. Disponível em: <<http://www.instron.com.br/>>.
- INTEL NUC. **site da Intel - NUC**. 2015. Disponível em: <<http://www.intel.com.br/content/www/br/pt/nuc/overview.html>>.

KAWADA INDUSTRIES. **HRP 4.** 2015. Disponível em: <<http://global.kawada.jp/mechatronics/hrp3.html>>.

LEEA JOSÉ A. GONZÁLEZB, J. H. L. Y. I. K. K. P. S. H. Y.-S. **Structural topology optimization of the transition piece for an offshore wind turbine with jacket foundation.** 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115301476>>.

PYXIS. **Virtual.Pyxis.** 2015. Disponível em: <www.virtualpyxיס.com.br>.

ROBOCUP. **RoboCup Soccer Humanoid League Rules and Setup.** 2015. Disponível em: <http://www.robocuphumanoid.org/wp-content/uploads/HumanoidLeagueRules2015_DRAFT_20141205.pdf>.

ROBOTCUB CONSORTIUM. **iCub.** 2015. Disponível em: <<https://en.wikipedia.org/wiki/iCub>>.

ROBOTIS - DYNAMIXEL. **MX-106T's Manual.** 2015. Disponível em: <http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/mx_series/mx-106.htm>.

SOLIDWORKS CORP. - SOLIDWORKS. **Definição material isotrópico.** 2015. Disponível em: <http://help.solidworks.com/2012/Portuguese-brazilian/SolidWorks/cosmosxpresshelp/c_Isotropic_Material.htm>.

WIKIPEDIA. **Acrilonitrila butadieno estireno.** 2015. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Acrilonitrila_butadieno_estireno>.

_____. **DARwIn-OP.** 2015. Disponível em: <<https://en.wikipedia.org/wiki/DARwIn-OP>>.