

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI
CAIO BRAGA JOSÉ

MECANISMO DE CHUTE COM DIREÇÃO VARIÁVEL

São Bernardo do Campo

2017

CAIO BRAGA JOSÉ

MECANISMO DE CHUTE COM DIREÇÃO VARIÁVEL

Relatório Final de Iniciação Científica
apresentado ao Centro Universitário FEI,
como parte dos requisitos do Programa
PIBIC-FEI. Orientado pelo Prof. Dr.
Flavio Tonidandel.

São Bernardo do Campo

2017

RESUMO

As leis da dinâmica nos permitem calcular com precisão a trajetória do movimento de corpos quando submetidos a condições conhecidas. Através desses conhecimentos é possível prever a direção do movimento de um corpo ao chocar-se com outro, como por exemplo a direção que uma bola vai tomar quando colide com a chuteira de um jogador. Isso é tão válido para um jogador humano chutando uma bola de futebol quanto para um pequeno robô lançando uma bola de golfe.

Assim, é possível desenvolver um mecanismo capaz de variar a direção esperada de lançamento da bola quando chutada pelo robô, relacionando essa variação com os parâmetros de acionamento do mecanismo em questão.

O sistema de chute do robô Small Size F-180 (SMALL SIZE LEAGUE, 2016) da equipe RoboFEI (CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI, 2016) consiste em um solenoide que quando acionado impulsiona um êmbolo que por sua vez colide com a bola. O modo de funcionamento atual desse mecanismo permite apenas que o robô chute para frente ou para cima, o que em determinadas situações é insuficiente.

O objetivo desse projeto é desenvolver um sistema de chute capaz de alterar a direção de lançamento do chute rasteiro desse robô, possibilitando o desenvolvimento de novas jogadas estratégicas para o time de futebol de robôs da FEI.

Palavras-chave: Futebol de robos. Solenoide. Dinâmica aplicada. Cinemática de partícula.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1:	Vista em corte, com o êmbolo retraído	9
Figura 2:	Vista em corte, com o êmbolo acionado	9
Figura 3:	Mecanismo do chute rasteiro	11
Figura 4:	Mecanismo do chute por cobertura.....	12
Figura 5:	Mecanismos de chute da equipe STOX's	12
Figura 6:	Mecanismos de chute da equipe KIKS	13
Figura 7:	Gráfico $v - t$ a partir do gráfico $s - t$	18
Figura 8:	Gráfico $a - t$ a partir do gráfico $v - t$	19
Figura 9:	Esquema do solenoide	24
Figura 10:	Modelo Preliminar	25
Figura 11:	Modelo Preliminar Acionado	25
Figura 12:	Vista em meio corte	26
Figura 13:	Detalhe da articulação.....	27
Figura 14:	Simulação no FEMM	30
Figura 15:	Gráfico Força magnética x Posição do êmbolo	31
Figura 16:	Geometria importada ao ambiente ANSYS	32
Figura 17:	Região de contato entre êmbolo e carretel	34
Figura 18:	Junta entre êmbolo e carretel	34
Figura 19:	Superfícies tratadas com Mapped Face Meshing	36
Figura 20:	Malha de elementos da simulação	37
Figura 21:	Configuração da força aplicada na junta	39
Figura 22:	Configuração das superfícies de apoio	39
Figura 23:	Diagrama de tensões	40
Figura 24:	Configuração da sonda	41
Figura 25:	Ângulo obtido na simulação $\Delta t = 2,5ms$	42
Figura 26:	Gráfico Δt x Ângulo de chute	43
Figura 27:	Simulação $\Delta t = 3ms$ - tensões observadas e colisão	44
Figura 28:	Desenho da montagem	46
Figura 29:	Foto dos solenoides	47

Figura 30:	Foto da montagem.....	47
Figura 31:	Chute angulado	48
Figura 32:	Chute angulado em jogo	49
Figura 33:	Diagrama de Tensões para $\Delta t = 0$	53
Figura 34:	Ângulo resultante para $\Delta t = 0$	53
Figura 35:	Diagrama de Tensões para $\Delta t = 0,5ms$	54
Figura 36:	Ângulo resultante para $\Delta t = 0,5ms$	54
Figura 37:	Diagrama de Tensões para $\Delta t = 1ms$	55
Figura 38:	Ângulo resultante para $\Delta t = 1ms$	55
Figura 39:	Diagrama de Tensões para $\Delta t = 1,5ms$	56
Figura 40:	Ângulo resultante para $\Delta t = 1,5ms$	56
Figura 41:	Diagrama de Tensões para $\Delta t = 2ms$	57
Figura 42:	Ângulo resultante para $\Delta t = 2ms$	57
Figura 43:	Diagrama de Tensões para $\Delta t = 2,5ms$	58
Figura 44:	Ângulo resultante para $\Delta t = 2,5ms$	58
Figura 45:	Diagrama de Tensões para $\Delta t = 3ms$	59
Figura 46:	Ângulo resultante para $\Delta t = 3ms$	59
Figura 47:	Desenho - Chapa Inferior - Contorno	60
Figura 48:	Desenho - Chapa Inferior - Furação	61
Figura 49:	Desenho - Suporte Solenoide	62
Figura 50:	Desenho - Suporte Solenoide Traseiro	63
Figura 51:	Desenho - Êmbolo.....	64
Figura 52:	Desenho - Braço do Kick	65
Figura 53:	Desenho - Pino da articulação	66
Figura 54:	Desenho - Kick	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Configuração das forças e timesteps	38
Tabela 2:	Tensão equivalente	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
1.1	OBJETIVO.....	8
1.2	JUSTIFICATIVA	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1	SISTEMAS DE CHUTE	11
2.2	SOLENOIDE	13
2.2.1	Campo Magnético	13
2.2.2	Capacitores.....	14
2.2.3	Autoindutância	15
2.2.4	Força Magnética	15
2.3	DINÂMICA.....	16
2.3.1	Cinemática de uma partícula	16
2.3.1.1	<i>Movimento retilíneo contínuo</i>	<i>16</i>
2.3.1.2	<i>Movimento retilíneo irregular.....</i>	<i>18</i>
2.3.2	Cinética de uma partícula	19
2.3.2.1	<i>Força e aceleração</i>	<i>19</i>
2.3.2.2	<i>Impulso e quantidade de movimento</i>	<i>19</i>
2.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS.....	20
2.4.1	Principais esforços atuantes.....	20
2.4.2	Tensões.....	21
2.4.3	Resistência	22
2.4.4	Módulo de elasticidade	22
2.4.5	Rigidez.....	23
3	METODOLOGIA	24
3.1	MODELO PRELIMINAR	24
3.1.1	Êmbolo	26
3.1.2	Extensão	26
3.1.3	Articulações.....	27

3.2	OBTENÇÃO DA FORÇA MAGNÉTICA	27
3.2.1	Corrente na bobina	28
3.2.2	Simulação Eletromagnética	29
3.3	SIMULAÇÕES DINÂMICAS.....	31
3.3.1	Configurações	31
3.3.1.1	<i>Propriedades dos materiais</i>	32
3.3.1.2	<i>Conexões</i>	33
3.3.1.3	<i>Malha de elementos</i>	35
3.3.1.4	<i>Parâmetros da análise e condições de contorno</i>	36
3.3.1.5	<i>Solução</i>	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	ÂNGULO DE CHUTE.....	42
4.2	TENSÕES EQUIVALENTES	43
4.3	DESENHOS TÉCNICOS, FABRICAÇÃO E MONTAGEM	45
4.4	TESTES DE FUNCIONALIDADE	46
5	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
	APÊNDICE	53

1 INTRODUÇÃO

O projeto RoboFEI, do Centro Universitário da FEI, envolve diversas pesquisas e estudos, realizados por alunos de graduação e pós-graduação, voltados para o aperfeiçoamento de robôs que participam de competições nacionais e internacionais de robótica, em várias categorias, com o objetivo de promover o desenvolvimento tecnológico nas áreas da engenharia mecânica, elétrica e ciência da computação. O órgão responsável pela organização e desenvolvimento das competições de robótica nas quais a equipe RoboFEI compete é a RoboCup (THE ROBOCUP FEDERATION, 2016), que estabelece as diferentes categorias e impõe suas normas e regras às equipes participantes.

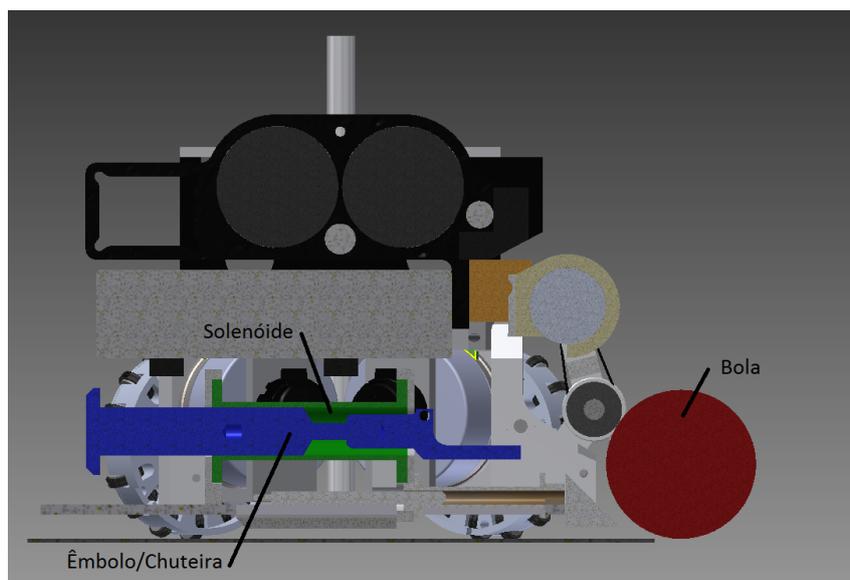
A categoria Small Size F-180, envolve robôs projetados para jogar futebol em times de 6 contra 6 que devem atuar de forma autônoma, sem intervenção humana. Esses robôs possuem um sistema de locomoção omnidirecional, um sistema de domínio da bola e dois mecanismos de chute, um para chutes rasteiros e outro para chutes por cobertura. O mecanismo de chute rasteiro consiste em um solenoide cilíndrico, que quando acionado, gera um campo magnético que movimenta o êmbolo para frente. Esse êmbolo é ligado à chuteira do robô, que ao colidir com a bola, transfere energia cinética a ela, como podemos ver nas figuras a seguir, produzidas no software Inventor (AUTODESK INC, 2016).

Esse sistema permite que o robô chute a bola para a frente, porém sem muita precisão, uma vez que a bola chega ao robô vinda de diferentes direções, o que pode influenciar no vetor da velocidade da bola após o chute, além disso, nem sempre a frente do robô está voltada exatamente para onde ele deve chutar.

1.1 OBJETIVO

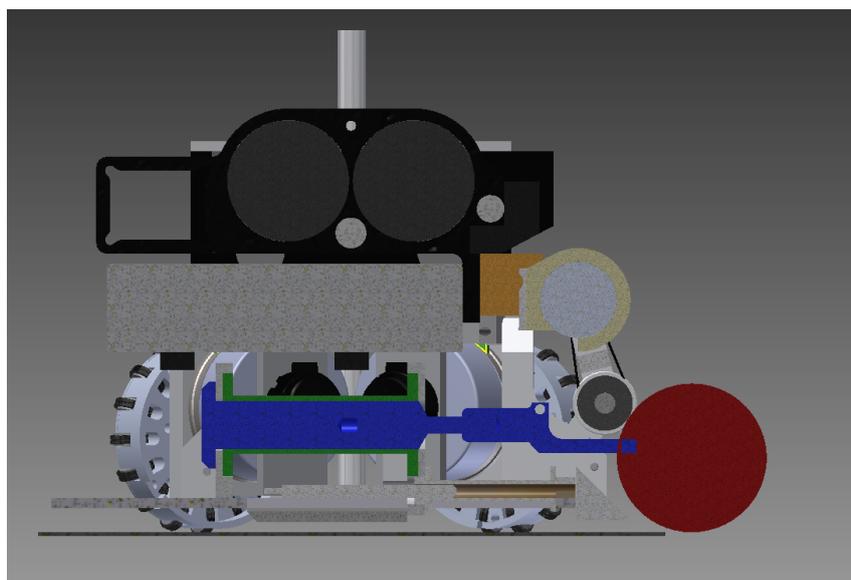
O objetivo deste projeto de iniciação científica é implementar um sistema de chute capaz de variar a direção da bola, através de dois êmbolos distintos, ambos ligados à chuteira do robô, relacionando a variação no ângulo do chute com os parâmetros do acionamento do mecanismo, o que permitirá calcular esse ângulo com precisão.

Figura 1: Vista em corte, com o êmbolo retraído



Fonte: Autor

Figura 2: Vista em corte, com o êmbolo acionado



Fonte: Autor

1.2 JUSTIFICATIVA

O projeto mecânico do robô Small Size F-180 da equipe da FEI já possui implementado todas as funcionalidades básicas necessárias para a competição nessa categoria, porém seu desempenho ainda deixa a desejar quando comparado com os robôs

das melhores equipes internacionais.

Tendo isso em mente, a equipe RoboFEI busca sempre aprimorar seus robôs, aperfeiçoando funções já existentes ou adicionando novas. Daí surgiu a possibilidade de implementar um sistema que permitisse que o robô chutasse em diferentes direções, independentemente da direção a que ele está voltado, o que permitira a execução de novas jogadas estratégicas.

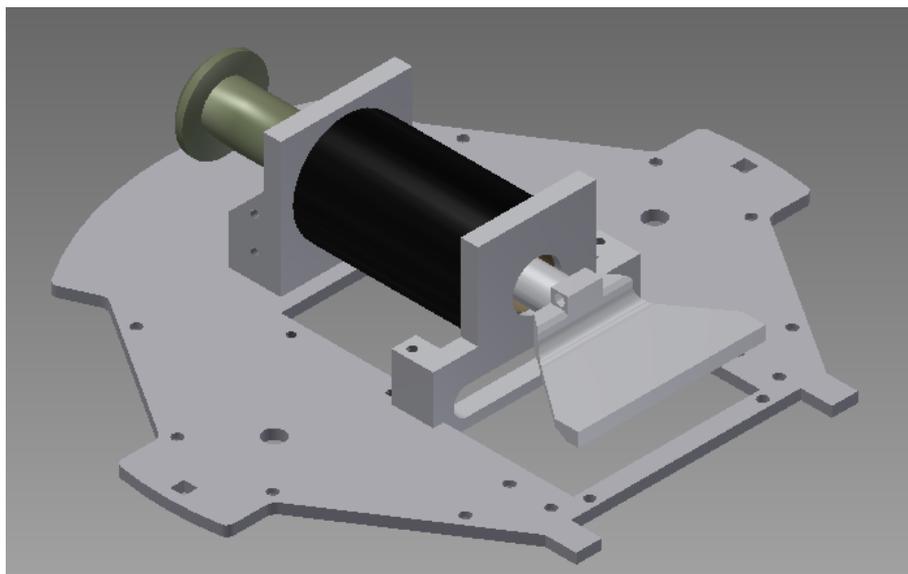
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desenvolvimento de um mecanismo de chute usando solenoides que seja capaz de alterar a direção em que a bola será lançada envolve vários conceitos de elétrica, dinâmica, e resistência dos materiais, que serão evidenciados a seguir.

2.1 SISTEMAS DE CHUTE

O projeto atual do robô Small Size F-180 da equipe RoboFEI possui dois sistemas de chute: um rasteiro e outro por cobertura. Ambos possuem um solenoide: uma bobina que, quando percorrida por corrente elétrica, gera um campo magnético em seu interior, que atrai um êmbolo. Por sua vez, o êmbolo se movimenta no interior do solenoide, recebendo energia cinética, até se chocar com a bola, transferindo parte dessa energia à ela.

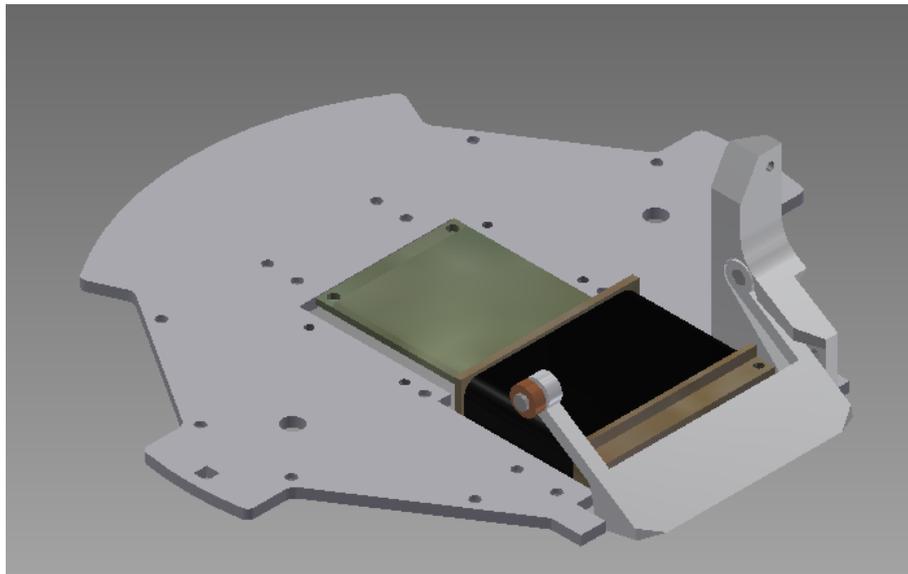
Figura 3: Mecanismo do chute rasteiro



Fonte: Autor

No chute rasteiro, o solenoide é de geometria cilíndrica, e a peça que entra em contato com a bola, chamada de “chuteira”, é fixada diretamente no êmbolo. O chute por cobertura, por sua vez, possui uma geometria achatada, denominada “flat”, além disso, o êmbolo é separado da chuteira, e choca-se com ela após o acionamento do solenoide.

Figura 4: Mecanismo do chute por cobertura



Fonte: Autor

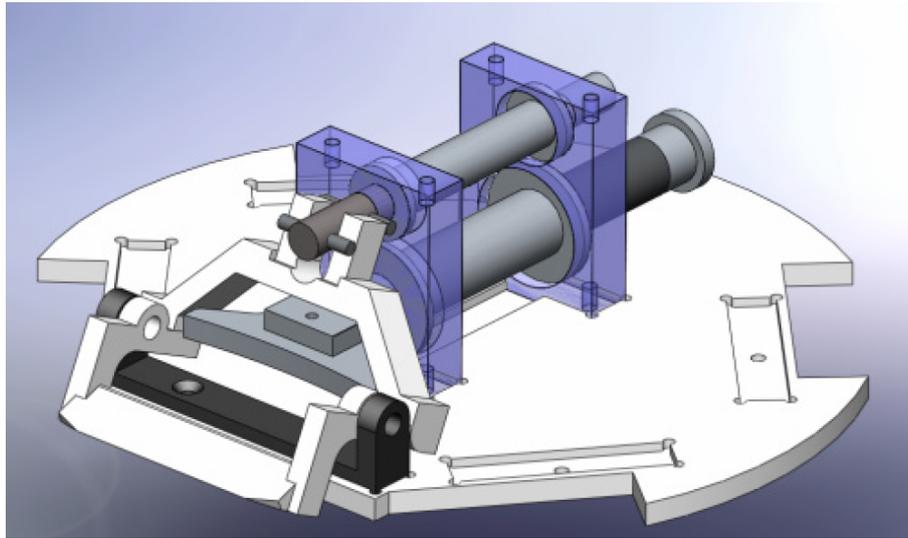
Tais sistemas também são utilizados por todas as equipes participantes da categoria, com poucas modificações. Por exemplo, a equipe colombiana STOX's (UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, 2016) usa solenoides “flat” tanto para o chute rasteiro quanto para o chute por cobertura, enquanto a equipe japonesa KIKS (TOYOTA NATIONAL COLLEGE OF TECHNOLOGY, 2016) usa solenoides cilíndricos para ambos os chutes, como pode-se ver nas figuras abaixo.

Figura 5: Mecanismos de chute da equipe STOX's



Fonte: RODRIGUEZ, Saith et al, 2014

Figura 6: Mecanismos de chute da equipe KIKS



Fonte: SUGIURA, Toko et al, 2010

2.2 SOLENOIDE

Segundo Halliday e Resnick (2012) um solenoide é “[...] uma bobina helicoidal formada por espiras muito próximas.” Quando essa bobina é percorrida por uma corrente elétrica, o solenoide gera um campo magnético em seu interior. Temas como campo magnético e indução são importantes para compreender o funcionamento de um solenoide e sua interação com o êmbolo.

2.2.1 Campo Magnético

O solenoide, quando percorrido por uma corrente, gera um campo magnético em seu interior. As linhas de indução desse campo são praticamente paralelas no interior do solenoide e sua intensidade é função da corrente I , número de espiras N , comprimento da bobina l e da permeabilidade magnética do material.

O módulo do campo magnético fica então definido pela seguinte equação (HALLIDAY, 2012):

$$B = \frac{\mu NI}{l} \quad (1)$$

2.2.2 Capacitores

Um capacitor consiste de placas condutoras separadas por um material isolante. Quando submetido à uma tensão V o capacitor começa a acumular cargas negativas em uma das placas e positiva na outra, até que a diferença de potencial entre as placas seja igual à tensão V . Quando isso ocorre significa que o capacitor está *carregado* com uma carga Q . Pode-se então calcular a *capacitância* do capacitor:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2)$$

Capacitores podem ser associados em paralelo ou em série, dependendo do resultado desejado. Quando ligados em série, a tensão, carga e capacitância equivalentes seguem essas relações:

$$Q_{eq} = Q_1 = Q_2$$

$$V_{eq} = V_1 + V_2$$

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

E em paralelo:

$$Q_{eq} = Q_1 + Q_2$$

$$V_{eq} = V_1 = V_2$$

$$C_{eq} = C_1 + C_2$$

A curva de descarga de um capacitor segue uma forma exponencial e depende da resistência R do circuito, tornando essa descarga mais rápida ou mais lenta. A constante de tempo capacitiva τ é o produto da capacitância C pela resistência R , pode-se considerar

o capacitor completamente descarregado após um tempo de 5τ .

$$\tau = C * R \quad (3)$$

A corrente elétrica fornecida por um capacitor depende da sua carga e portanto também segue uma função exponencial, determinada pela seguinte equação:

$$I(t) = I_{max}e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

2.2.3 Autoindutância

Indutância é a capacidade de um circuito produzir força eletromotriz pelo processo de indução. Quando um corpo com propriedades magnéticas, como o ferro por exemplo, é atraído por um campo magnético e se aproxima do mesmo, ele distorce as linhas de campo, alterando o valor da indutância do circuito, num processo chamado de *autoindutância*.

Em um indutor de N espiras, submetido à uma corrente i , surge um fluxo magnético Φ . Assim, a indutância fica definida por:

$$L = \frac{N\Phi}{i} \quad (5)$$

O fluxo magnético é o produto do campo magnético B pela área da seção transversal A da bobina:

$$\Phi = B * A$$

Como $B = \mu NI/l$, substituindo na equação (5), temos:

$$L = \frac{\mu AN^2}{l} \quad (6)$$

2.2.4 Força Magnética

A força magnética atuante em um corpo magnético que se locomove no interior de um solenoide é dada pela variação da autoindutância em função do deslocamento desse

corpo e a variação da corrente presente na bobina em função do tempo.

$$F(x, t) = \frac{I^2(t)}{2} \frac{dL}{dx} \quad (7)$$

2.3 DINÂMICA

Dinâmica é o ramo da Mecânica que estuda corpos em movimento acelerado. Ela é dividida em duas partes: cinemática e cinética.

A cinemática estuda apenas o aspecto geométrico do movimento de corpos ou partículas. Segundo Hibbeler (2001) “A cinemática de uma partícula é caracterizada ao se especificar, em qualquer instante, a posição, velocidade e aceleração da partícula.”

A cinética analisa a relação entre as variações no movimento de um corpo e as forças que causam essas alterações.

2.3.1 Cinemática de uma partícula

A palavra “partícula” nos traz a ideia de algo extremamente pequeno, indivisível. Porém, para efeito de estudos dinâmicos, qualquer objeto, por maior que seja, pode ser considerado uma partícula, basta que seu movimento seja definido pelo movimento do seu centro de massa e que movimentos de rotação sejam desprezados.

2.3.1.1 Movimento retilíneo contínuo

Sendo s a posição de uma partícula ao longo de uma trajetória retilínea, podemos determinar o deslocamento dessa partícula como sendo a variação dessa posição, ou seja:

$$\Delta s = s' - s$$

Onde s' seria a posição dessa mesma partícula após um período de tempo Δt . Dessa forma pode-se também obter a velocidade média da partícula:

$$v_m = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Adotando-se valores cada vez menores para Δt , obteremos também um Δs cada

vez menor, chegando assim à velocidade instantânea, definida por $v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta s / \Delta t)$, ou seja:

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (8)$$

O mesmo processo pode ser utilizado para se obter a aceleração, sendo essa a variação da velocidade. Conhecendo-se a velocidade da partícula em dois pontos, a aceleração média dessa partícula durante o intervalo de tempo Δt é:

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

E de maneira semelhante à velocidade, temos que a aceleração instantânea pode ser determinada por $a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\Delta v / \Delta t)$ e, portanto:

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (9)$$

Admitindo-se a aceleração como sendo constante ao longo do movimento da partícula, as equações 1 e 2 podem ser integradas, obtendo-se assim expressões que relacionam a , v , s e t .

Integrando $a = dv/dt$, adotando inicialmente $v = v_0$ para $t = 0$ temos:

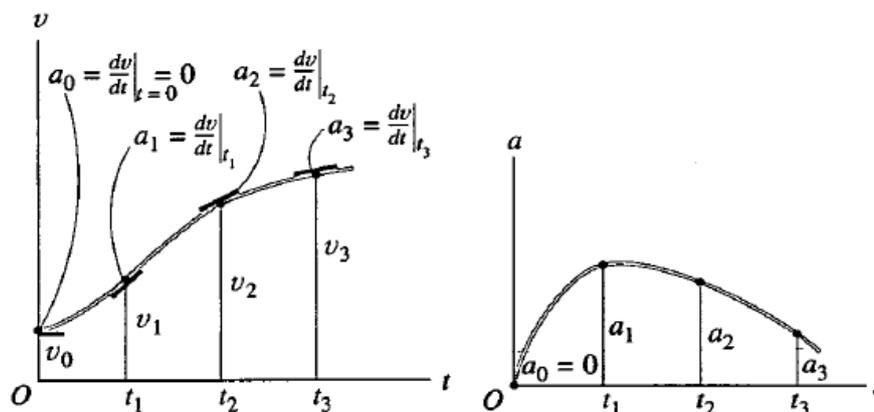
$$\int_{v_0}^v dv = \int_0^t a dt$$

$$v = v_0 + at \quad (10)$$

Integrando $v = v_0 + at$, adotando inicialmente $s = s_0$ para $t = 0$ temos:

$$\int_{s_0}^s ds = \int_0^t (v_0 + at) dt$$

$$s = s_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2} \quad (11)$$

Figura 8: Gráfico $a - t$ a partir do gráfico $v - t$ (a) Gráfico $v - t$ (b) Gráfico $a - t$ 

Fonte: HIBBELER, 2001

2.3.2 Cinética de uma partícula

A cinética fundamenta-se na segunda lei de Newton, que afirma que "quando uma força desequilibrada atua sobre uma partícula, a partícula *acelerará* na direção da força com uma intensidade que é proporcional à força." (HIBBELER, 2001, p.83).

2.3.2.1 Força e aceleração

Sendo m a massa da partícula, a segunda lei de Newton pode ser escrita matematicamente da seguinte forma:

$$F = ma \quad (12)$$

Onde F é a força resultante que atua na partícula e a é a aceleração à qual a partícula estará submetida.

2.3.2.2 Impulso e quantidade de movimento

Podemos escrever a equação do movimento de uma partícula como:

$$\sum F = ma = m \frac{dv}{dt} \quad (13)$$

Ao se rearranjar os termos e integrar entre os limites $v = v_0$ em $t = t_0$ e $v = v_1$ em $t = t_1$, temos:

$$\sum \int_{t_1}^{t_2} F dt = mv_2 - mv_{v1} \quad (14)$$

Essa fórmula permite obter a velocidade v_2 da partícula dado um período de tempo e conhecendo-se as forças atuando na mesma.

2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

São propriedades inerentes aos materiais que definem o seu comportamento quando solicitados mecanicamente por esforços externos, como por exemplo, a maneira como o material se deforma, sua capacidade de resistir a tais esforços bem como a capacidade de transmiti-los, entre outros (CALLISTER, 2008).

A compreensão dessas propriedades e suas implicações é de suma importância no desenvolvimento de qualquer projeto mecânico, uma vez que elas que determinam a confiabilidade e a segurança do projeto.

2.4.1 Principais esforços atuantes

São os diferentes tipos de esforços e suas características particulares:

- Tração e Compressão - São esforços que, por sua linha de atuação passar pelo ponto de apoio do corpo, são causados por forças normais e tendem a causar efeitos de alongamento (tração) ou encurtamento (compressão). Quando a sentido da força é inverso ao apoio ocorre tração, quando o sentido é voltado para o apoio ocorre compressão.
- Cisalhamento - Esforço que atua perpendicularmente à linha do apoio, que tende a cortar o corpo, daí o nome de sua causa ser a força cortante. No cisalhamento, duas seções vizinhas do corpo deslocam-se paralelamente em sentidos opostos.
- Flexão - Solicitação que tende a girar ou fletir o corpo, causado por um momento fletor. Ocorre quando as linhas de tensão formam uma rotação angular no eixo geométrico tangencial ao ponto de apoio do corpo.

- Torção - Como o nome supõe, é um esforço que tende a torcer o corpo ao provocar uma rotação no eixo geométrico axial ao ponto de apoio. As cargas que ocasionam a torção são chamadas de momento torçor.

2.4.2 Tensões

Tensão é o conceito que permite determinar quão grande é o estresse sofrido por um corpo quando submetido a esforços atuantes. A tensão é função da carga aplicada no corpo e da área da seção do corpo que está resistindo a ao esforço gerado por essa carga. Existem dois tipos de tensões: a tensão normal σ , oriunda de esforços de tração, compressão e flexão; e a tensão de cisalhamento τ , causada por esforços cisalhantes e torçores.

A tensão normal na tração ou compressão é dada por:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (15)$$

Onde F é a força normal [N] e A é a área da seção transversal [mm^2].

A tensão de cisalhamento na força cortante é dada por:

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (16)$$

Onde V é a força cortante [N].

A tensão na flexão é dada por:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{M}{I}y \quad (17)$$

Onde M é o momento fletor [$N.mm$], W é o módulo de resistência a flexão [mm^3], I é o momento de inércia [mm^4] e y é a distância a partir da linha neutra ($\sigma = 0$).

O módulo de resistência à flexão W e o momento de inércia I dependem da geometria do corpo em questão.

Para a torção, a tensão é dada por:

$$\tau = \frac{T}{W_t} = \frac{T}{J}\rho \quad (18)$$

Onde T é o momento torçor [$N.mm$], W_t é o módulo de resistência à torção [mm^3], J é o momento polar de inércia [mm^4] e ρ é a distância partir da linha neutra.

De maneira semelhante à flexão, na torção W_t e J são determinados pela geometria do corpo.

2.4.3 Resistência

Todo material possui uma tensão limite que é capaz de suportar antes de começar a se deformar de forma permanente. Essa tensão é chamada de tensão limite de escoamento, ou σ_e . Além disso, há a tensão limite de ruptura, que equivale ao estresse que o material suporta ante de se romper ou quebrar. Para a maioria dos projetos, a tensão usada para dimensionamento de peças é a tensão de escoamento, uma vez que geralmente não se deseja deformações permanentes na estrutura.

Além disso, toda aplicação está submetida a um coeficiente de segurança (CS) que relaciona a tensão limite do material com a tensão admissível (σ_{adm}) no projeto. Quanto maior o CS , menor σ_{adm} em relação a σ_e , como determina a equação:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_e}{CS} \quad (19)$$

Para que um projeto tenha segurança é necessário que seu CS seja superior a 1 e garantir que as tensões atuantes sejam menores que a admissível.

2.4.4 Módulo de elasticidade

Sempre que um corpo está sob a ação de forças e momentos atuantes ele sofrerá algum tipo de deformação. A intensidade dessa deformação é proporcional à magnitude dos esforços atuantes e também ao módulo de elasticidade do material.

Como mencionado anteriormente, enquanto a tensão atuante no corpo for menor que a tensão de escoamento, o corpo não irá se deformar plasticamente, ou seja, ele irá retornar ao seu tamanho e formato original caso os esforços sejam removidos, nesse caso, o comportamento do material segue a Lei de Hooke:

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (20)$$

Onde σ é a tensão normal [MPa], E é o módulo de elasticidade longitudinal do material [MPa], e ε é a deformação específica longitudinal [adimensional]

Ou então:

$$\tau = G.\gamma \quad (21)$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento [MPa], G é o módulo de elasticidade transversal do material [MPa], e γ é o ângulo de distorção [rad].

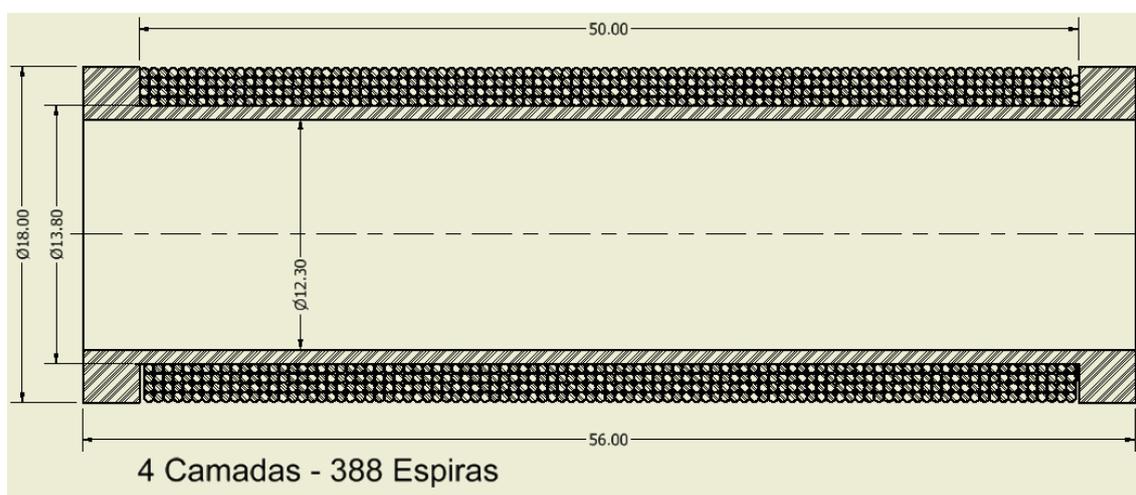
2.4.5 Rigidez

Além de resistir ao carregamento proporcionado pelos esforços atuantes, é importante também que o material não se deforme muito, para que mantenha sua integridade geométrica, permitindo que realize sua função adequadamente. Assim, é necessário garantir que o material seja rígido o suficiente para que, mesmo quando exposto a altas tensões, sua deformação total seja menor que a admissível.

3 METODOLOGIA

Como mencionado anteriormente, o mecanismo em desenvolvimento consistirá em um conjunto de dois solenoides paralelos. O tamanho e a geometria desses solenoides serão iguais ao que já foi desenvolvido por alunos do RoboFEI, uma vez que ele satisfaz as necessidades do projeto quanto à limitação de espaço e força de chute necessária. O esquema desse solenoide está detalhado na Figura 9. A bobina do solenoide possui 4 camadas, cada uma com 97 espiras, totalizando 388 espiras.

Figura 9: Esquema do solenoide



Fonte: Autor

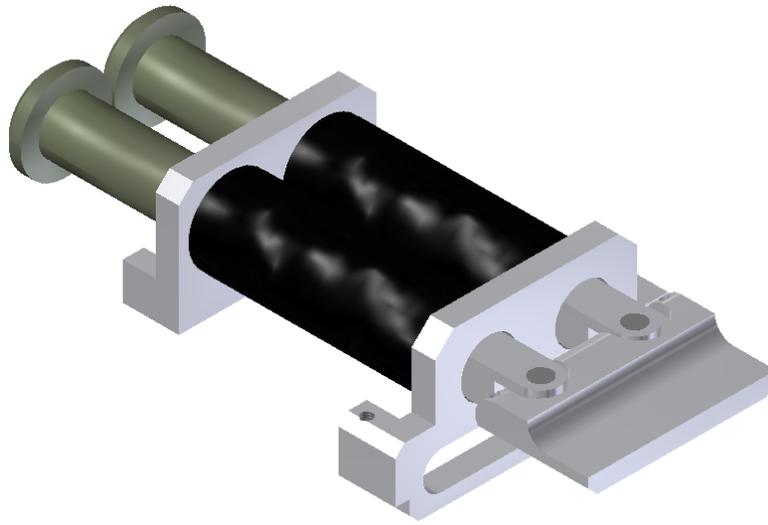
Nessa figura estão ilustrados a bobina, com todas as suas espiras, e também o *carretel* que a sustenta.

Com as dimensões do solenoide foi possível desenvolver uma versão preliminar das peças restantes do mecanismo. Esse modelo inicial será usado nas primeiras simulações para determinar diversas variáveis do projeto.

3.1 MODELO PRELIMINAR

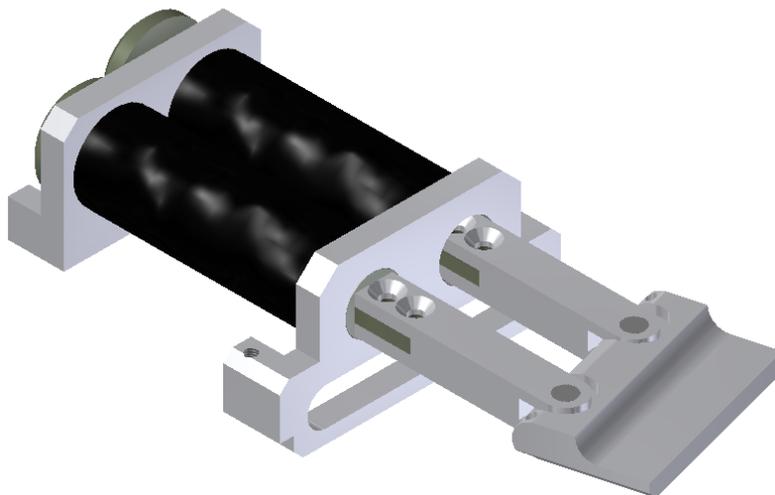
Baseado nos estudos realizados no mecanismo de chute atual e no de outras equipes, bem como nas novas liberdades de movimento e articulações que serão necessárias, foi elaborado o modelo preliminar do projeto, que está ilustrado nas Figuras 10 e 11.

Figura 10: Modelo Preliminar



Fonte: Autor

Figura 11: Modelo Preliminar Acionado



Fonte: Autor

Para chegar a esse modelo, foram observadas várias condições, que são discutidas a seguir.

3.1.1 Êmbolo

Assim como nos outros mecanismos de chute, o êmbolo deve correr pelo interior do solenoide livremente através de uma folga radial entre a superfície interior do *carretel* e o próprio êmbolo.

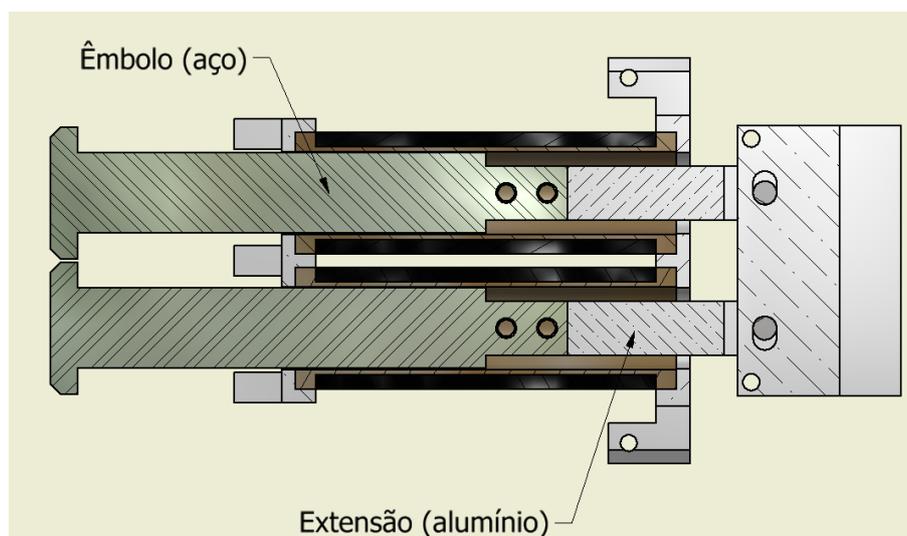
Para otimizar a energia cinética transferida ao êmbolo, ele deve permanecer apenas parcialmente dentro do solenoide antes do seu acionamento. Em contrapartida, o fim de curso deve ser no ponto em que o êmbolo esteja com a maior parte de sua massa no interior da bobina.

3.1.2 Extensão

Durante todo o funcionamento do mecanismo é importante que a única peça com propriedades magnéticas no interior do solenoide seja o êmbolo, pois caso contrário, haverá uma alteração no fluxo magnético e uma consequente redução do desempenho do mecanismo.

Sendo assim, foi necessário criar uma peça adicional, uma *extensão*, de material não magnético, que liga o êmbolo ao restante do mecanismo. Inicialmente, pretende-se fazer essa peça em alumínio, vide Figura 12.

Figura 12: Vista em meio corte



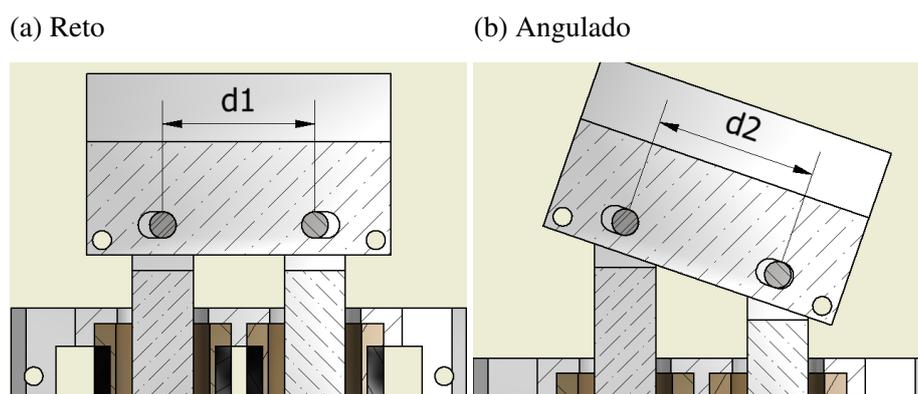
Fonte: Autor

3.1.3 Articulações

Para possibilitar o movimento angular pretendido na chuteira, criou-se um sistema de articulação entre ambas as *extensões* e a chuteira. Essa articulação, além de poder variar seu ângulo, também deve permitir pequenas variações na posição em que estão fixadas na chuteira.

Para tanto, a ligação entre a chuteira e as extensões será através de pequenos pinos de aço. Esses pinos de aço serão presos por interferência nas extensões, enquanto que na chuteira eles poderão girar livremente devido a uma pequena folga diametral e também poderão se movimentar alguns milímetros na transversal devido à geometria alongada do furo, como pode-se observar na Figura 13.

Figura 13: Detalhe da articulação



Fonte: Autor

3.2 OBTENÇÃO DA FORÇA MAGNÉTICA

Obter a força magnética que atua no êmbolo de maneira analítica se provaria extremamente trabalhoso, além disso, o resultado obtido dessa maneira seria um valor ideal, sem muita proximidade com o real. Optou-se então por calcular essa força usando o software Finite Element Method Magnetics (MEEKER, 2014).

3.2.1 Corrente na bobina

A corrente presente na bobina depende diretamente dos capacitores utilizados para alimentar o solenoide. No robô atual do RoboFEI, são utilizados dois capacitores de $2700\mu F$ ligados em paralelo e são carregados a uma tensão de $160V$.

Quando o solenoide é acionado, a única resistência no circuito é a do próprio enrolamento da bobina. O fio de cobre utilizado na bobina é o AWG 24 que possui as seguintes propriedades:

- Diâmetro: $0,5106mm$
- Secção: $0,20mm^2$
- Peso: $1,82Kg/Km$
- Resistência: $85,0ohms/Km$

Como o enrolamento possui 388 espiras, com um diâmetro médio de $15,9mm$, temos que a resistência total da bobina é dada por:

$$R_{bobina} = 85 * 10^{-3} \left(\frac{ohms}{m} \right) * \pi 15,9 * 10^{-3} (m) * 388 (espiras) = 1,647ohms$$

Devido à ligação em paralelo, a capacitância equivalente C do sistema é $5400\mu F$. Logo, pode-se calcular a constante de tempo τ através da equação (3):

$$\tau = 5400(\mu F) * 1,647(ohms) = 8,896ms$$

No projeto atual do solenoide, o tempo de acionamento possui 16 níveis, cada nível adicionando um tempo de $100\mu s$, até um total de $1,6ms$ no tempo máximo. Esses valores foram determinados pelos alunos que desenvolveram o solenoide.

Além disso, podemos calcular a corrente máxima I_{max} que o capacitor pode gerar no circuito através da Lei de Ohm (HALLIDAY, 2012), sabendo que a tensão no início da descarga do capacitor é igual àquela com que ele foi carregado.

$$V = R * I$$

$$160(V) = 1,647(ohms) * I_{max} = 97,15A$$

Vale lembrar que a corrente cai rapidamente durante o acionamento do solenoide, o valor de I_{max} corresponde apenas a um pico momentâneo de corrente, portanto se faz necessário calcular a corrente média que atua no enrolamento do solenoide. Assumindo que o tempo de acionamento seja de $1,6ms$, podemos determinar a corrente no final desse período através da equação (4):

$$I(1,6ms) = 97,15(A) * e^{-\frac{1,6(ms)}{8,896(ms)}}$$

$$I(1,6ms) = 81,16A$$

Portanto, a corrente média durante o acionamento do solenoide é algo em torno de $89A$.

3.2.2 Simulação Eletromagnética

Tendo em mãos a corrente média atuante no solenoide, foi possível realizar a simulação no software FEMM (Finite Element Method Magnetics) e obter a força atuante no êmbolo em diversos pontos ao longo de sua trajetória.

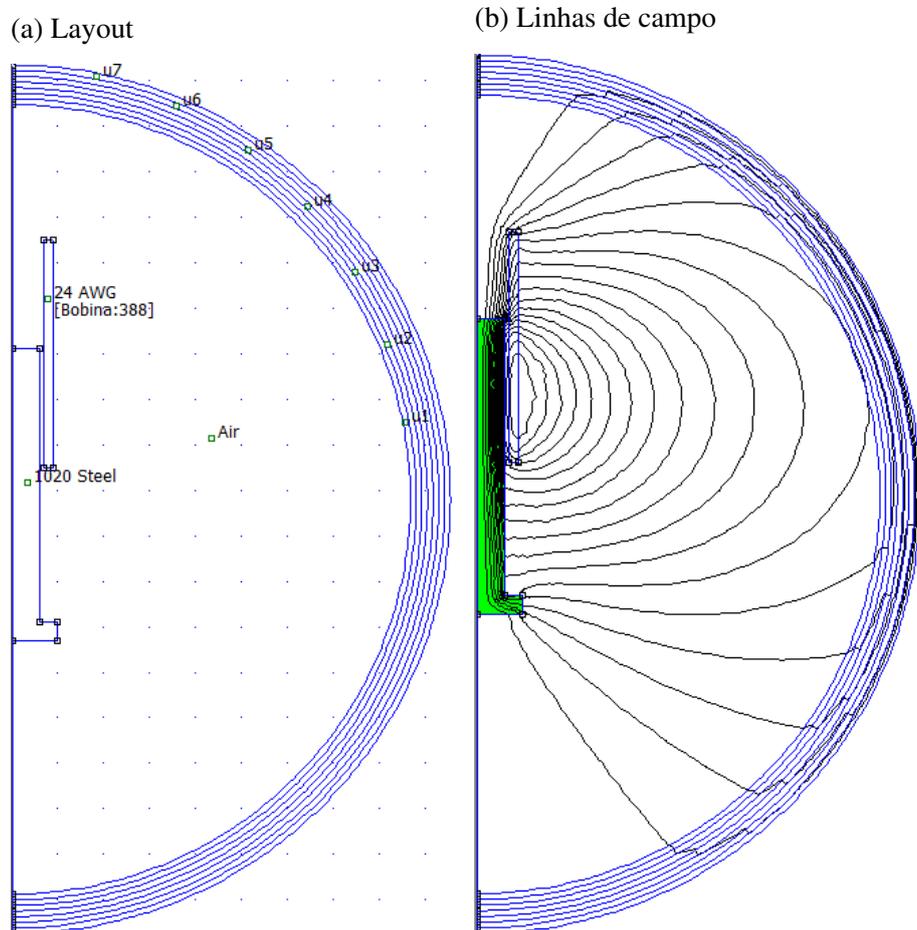
A simulação foi feita em diversas etapas programadas, em cada uma delas o software realizava os cálculos necessários e retornava a força obtida. Antes da etapa seguinte, o êmbolo era deslocado de $1mm$ em sua trajetória e em seguida os cálculos eram realizados novamente. Ao todo foram realizadas 30 etapas, totalizando os $30mm$ de curso que o êmbolo possui.

Como tanto o solenoide quanto o êmbolo possuem formato cilíndrico, foi possível usar um eixo de simetria na simulação, diminuindo assim o número de elementos na malha e consequentemente o tempo necessário para obter a solução de cada etapa. Na Figura 14a pode-se observar o layout usado na simulação.

Os diversos círculos presentes ao redor do solenoide no layout são um artifício usado pelo programa para simular a condição de fronteira infinita, já que seria impossível calcular a solução para um número infinito de elementos.

Na Figura 14b está representada uma das etapas da simulação, mostrando as linhas do campo magnético formado pela bobina.

Figura 14: Simulação no FEMM



Fonte: Autor

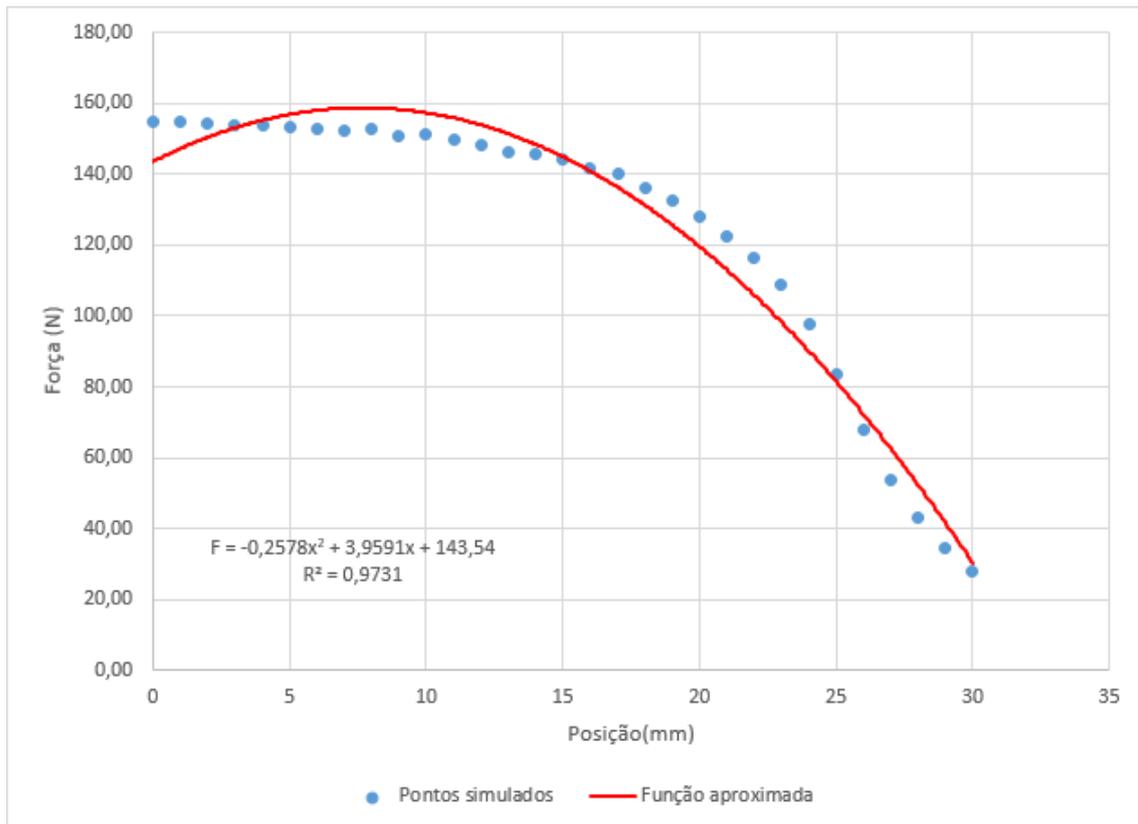
Sendo $x = 0$ a posição em que o êmbolo encontra-se retraído, e $x = 30$ a que ele se encontra totalmente no interior do solenoide, ao aplicar uma corrente de $89A$ na bobina, foi possível elaborar o gráfico da Figura 15.

A curva em vermelho no gráfico foi obtida através do método dos mínimos quadrados utilizando os pontos calculados na simulação, supondo nesse caso uma função polinomial de segunda ordem, obteve-se:

$$F = -0,2578x^2 + 3,9591x + 143,54 \quad (22)$$

Com x em milímetros e F em newtons.

Figura 15: Gráfico Força magnética x Posição do êmbolo



Fonte: Autor

3.3 SIMULAÇÕES DINÂMICAS

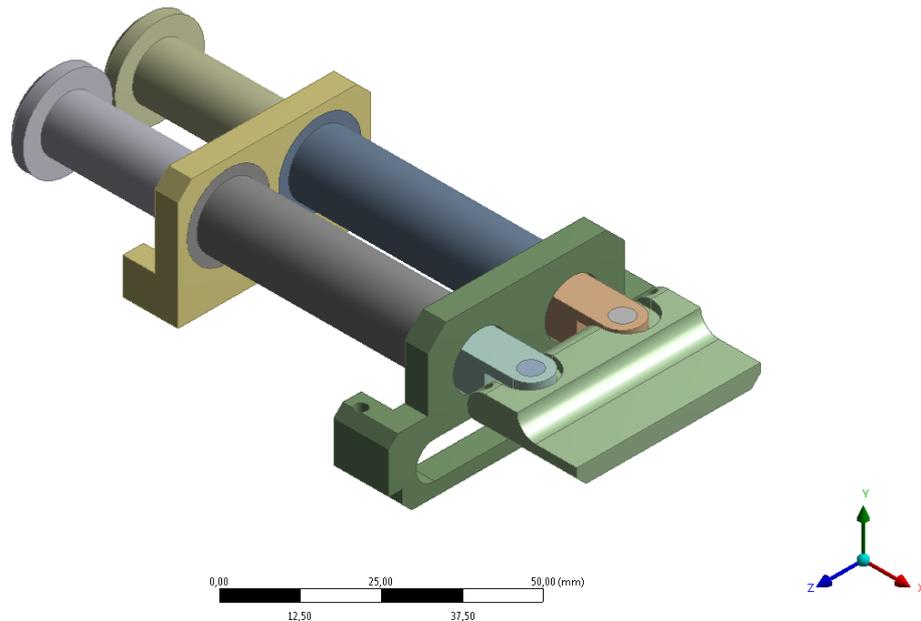
Existem diversas maneiras de realizar uma simulação dinâmica no ANSYS, porém a mais favorável para esse caso é uma simulação estrutural transiente (Transient Structural). Em outras palavras, trata-se de uma simulação de elementos finitos que pode ser dividida em diversas etapas (time steps), nas quais podem haver diferentes situações de cargas, esforços, acelerações, etc. Essa simulação busca determinar, para cada time step, o estado de tensão e deformação e também a posição dos diferentes elementos do sistema.

3.3.1 Configurações

Para iniciar o setup da simulação foi necessário primeiramente importar a montagem do mecanismo para o software de análise. Com o intuito de minimizar o tempo necessário para a convergência da solução do sistema, apenas as partes mecânicas diretamente

envolvidas com o funcionamento do mecanismo foram importadas, como pode ser observado na Figura 16.

Figura 16: Geometria importada ao ambiente ANSYS



Fonte: Autor

Com a geometria já dentro do ambiente do ANSYS Workbench, iniciou-se a configuração das diferentes propriedades necessárias:

- Propriedades dos materiais
- Conexões (regiões de contato e juntas)
- Malha de elementos
- Parâmetros da análise e condições de contorno
- Solução

3.3.1.1 *Propriedades dos materiais*

É necessário determinar no ambiente de análise as propriedades de cada material que constituem as peças do mecanismo. O Workbench já possui uma biblioteca com características de diversos materiais, incluindo diferentes aços e ligas de alumínio.

Para essa simulação foi usado o material “Structural Steel” para o êmbolo e para os pinos da articulação, esse material corresponde a um aço comum de baixo carbono, com módulo de elasticidade de $200GPa$, coeficiente de Poisson igual a $0,3$ e densidade de $7850kg/m^3$. Para o restante das peças, o material utilizado foi o “Aluminum Alloy”, que seria o equivalente a uma liga de alumínio comum, com módulo de elasticidade $71GPa$, coeficiente de Poisson $0,33$ e densidade de $2770kg/m^3$.

3.3.1.2 Conexões

Por conexões aqui subentende-se as regiões do sistema em que há contato entre duas ou mais peças distintas, bem como o tipo de interação que há nessa área de contato e os graus de liberdade dessa ligação.

O Workbench cria automaticamente algumas regiões de contato no modelo assim que a geometria é importada, porém nem sempre elas estão corretas e são fisicamente precisas, portanto, para garantir que o modelo fique o mais próximo possível da realidade, os diferentes contatos e juntas devem ser configurados manualmente.

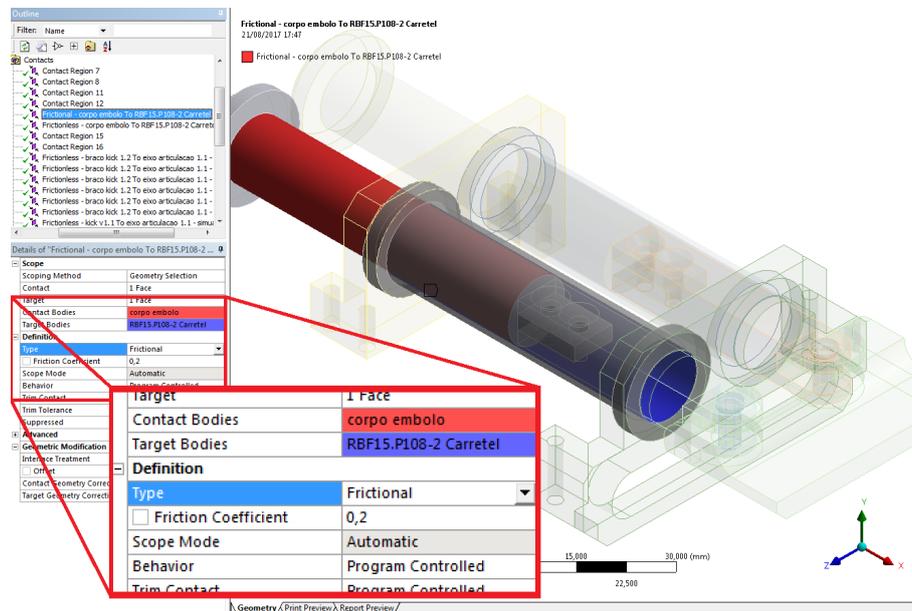
No Workbench temos dois tipos de conexões: contatos e juntas. Uma região de contato é uma superfície comum a dois corpos distintos na qual pode haver troca de esforços entre esses corpos. Uma junta, por outro lado, liga superfícies de corpos distintos e estabelece quais os movimentos relativos que podem ocorrer nessa ligação, ou seja, determina os graus de liberdade que existem entre os dois corpos envolvidos.

Na Figura 17 está a configuração da região de contato existente entre um dos êmbolos e seu respectivo carretel. Pode-se observar no canto inferior esquerdo os parâmetros utilizados para esse contato, que no caso trata-se de uma região de contato onde há atrito entre as duas partes, com um coeficiente de atrito estimado de $0,2$.

Na Figura 18 está a configuração da junta que liga o êmbolo ao carretel do solenoide, pode-se observar no canto esquerdo que se trata de uma junta translacional no eixo x , ou seja, o único movimento relativo que pode ocorrer entre ambos os corpos é o deslocamento ao longo do eixo x , além disso, foi configurado também o curso total do êmbolo, que pode ir de $0mm$ (posição inicial) até $30mm$ de deslocamento no eixo x (fim do curso).

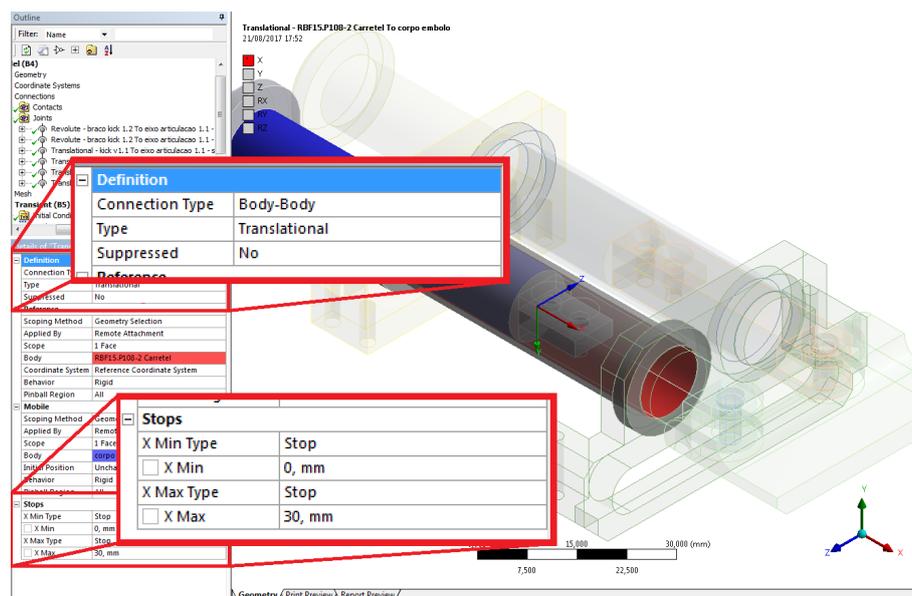
De maneira semelhante, as outras juntas e regiões de contatos foram configuradas, até que todos os contatos e juntas presentes no modelo fossem o mais próximo possível aos reais.

Figura 17: Região de contato entre êmbolo e carretel



Fonte: Autor

Figura 18: Junta entre êmbolo e carretel



Fonte: Autor

3.3.1.3 *Malha de elementos*

A malha é o conjunto de todos os elementos finitos que determinam a geometria dos corpos presentes na simulação, ela determina o grau de refinamento que a simulação em si terá. Quanto maior o número de elementos da malha, mais refinada a simulação ficará, e quanto menor esse número, mais grosseira será a análise.

Contudo, aumentar o número de elementos também aumenta o tempo necessário para o processamento de todos os cálculos envolvidos até alcançar a convergência do sistema. Essa relação entre tempo de processamento e número de elementos não é linear, por exemplo, se a análise de um sistema com 100 mil elementos demorar em torno de 5 minutos, uma análise semelhante do mesmo sistema, porém com 1 milhão de elementos, pode durar várias horas.

Um método muito utilizado para se determinar o número de elementos de malha adequados para determinada simulação consiste em realizar uma simulação inicial com uma malha de poucos elementos, bem grosseira, e observar os resultados de tensão e deformação. A partir daí, diminui-se um pouco o tamanho dos elementos, o que gera uma malha com mais elementos e mais refinada, e após executar a simulação, compara-se as tensões e deformações obtidas com àquelas da simulação anterior. Repete-se esse processo várias vezes, até que o erro E observado entre a última simulação e a sua anterior esteja dentro de um intervalo aceitável.

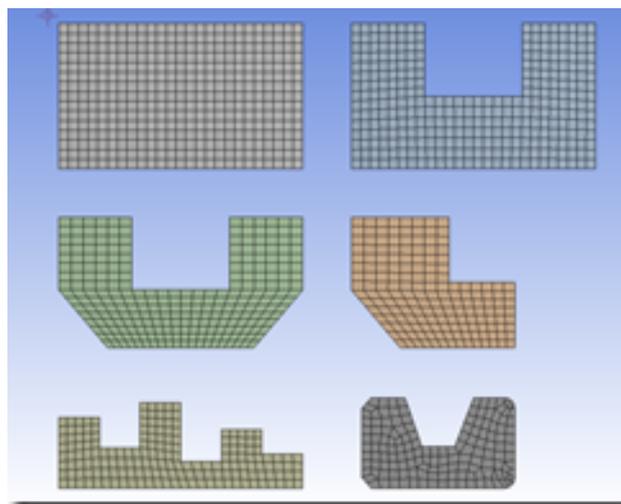
Seguindo esse método e adotando $E \leq 5\%$, obteve-se um resultado satisfatório que ocorreu logo na terceira iteração, com 17726 elementos de malha.

Além disso, existem outras maneiras de refinamento de malha, e ainda boas-práticas na configuração da malha, que podem melhorar o resultado de uma simulação sem necessariamente aumentar o número de elementos, tais como:

“Mapped Face Meshing” (Malha de face mapeada): É uma técnica que busca uniformizar a geometria dos elementos em uma determinada face da peça. Quanto mais simples a topologia mais homogênea será a malha de elementos naquela face, como pode-se observar na Figura 19.

Essa homogeneidade é importante principalmente quando há transmissão de esforços entre a superfície de dois corpos diferentes. Realizando esse mapeamento na malha das duas superfícies em contato, os nós de cada corpo estarão melhor alinhados

Figura 19: Superfícies tratadas com Mapped Face Meshing



Fonte: MILLER, Eric, 2011

e a transferência dos esforços se dá de maneira mais precisa e simples, melhorando os resultados obtidos e diminuindo o tempo de processamento.

“Mesh Sizing” (Dimensionamento da Malha): Consiste em definir manualmente as dimensões (máximas e/ou mínimas) dos elementos dos corpos presentes na simulação. Assim é possível determinar para cada peça ou região um tamanho de elemento adequado às particularidades da sua geometria e solicitação mecânica.

O resultado final da malha obtida pode ser observada na Figura 20, com um total de 17726 elementos, 49255 nós e refinamento da malha ao redor dos pinos da articulação, onde o tamanho dos elementos é de $0,5mm$. O tempo médio de cada análise com essa malha ficou em torno de 35 minutos.

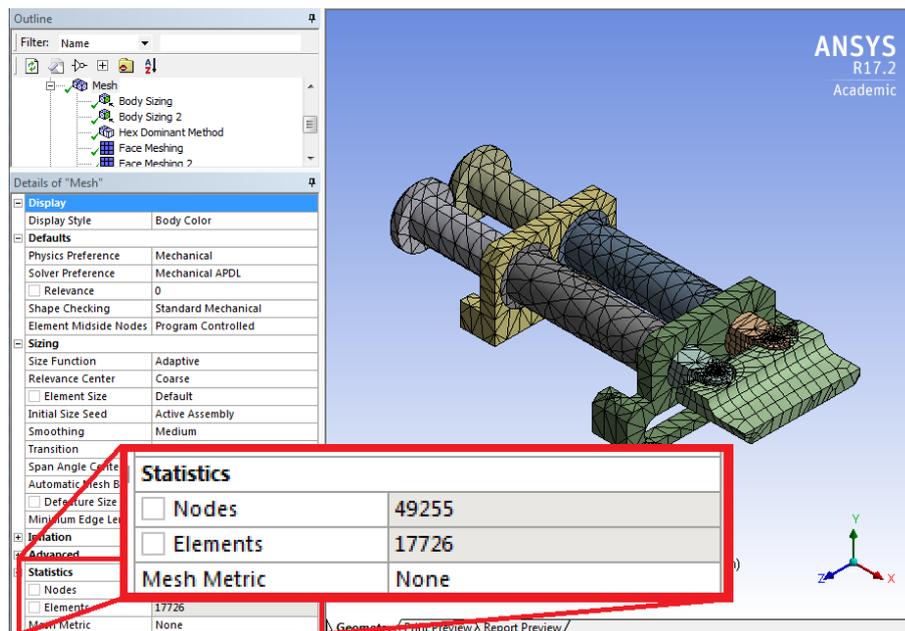
3.3.1.4 *Parâmetros da análise e condições de contorno*

Pretende-se realizar diversas simulações, cada uma com um Δt diferente, com o intuito de obter diferentes ângulos de chute. Para tanto, cada análise deverá ser configurada de maneira diferente quanto ao instante em que as forças magnéticas serão aplicadas individualmente a cada êmbolo do modelo.

Para poder iniciar essas configurações, é necessário antes compreender o conceito de *time step* e *substep* usado no ANSYS.

Um *time step* corresponde a um período de tempo que se passa na simulação,

Figura 20: Malha de elementos da simulação



Fonte: Autor

durante o qual as condições de contorno se mantêm as mesmas. A cada instante que houver alteração em alguma dessas condições, faz-se necessário a criação de um novo *time step*.

Um *substep* é a menor divisão de tempo presente na simulação e portanto um *time step* pode conter vários *substeps*. A cada *substep* o programa atualiza os deslocamentos, as tensões e as deformações de todos os elementos na malha, tomando como partida as condições de contorno do seu respectivo *time step*, salvando os resultados em um “arquivo relatório”, que será usado mais tarde para a obtenção das soluções requeridas pelo usuário.

Com base nisso e sabendo que o tempo de acionamento de cada solenoide é de $1,6ms$, foi elaborada a Tabela 1 que relaciona cada simulação que será realizada com os *time steps* que serão necessários para se obter o Δt correto.

Os tempos na tabela estão em milissegundos e representam o instante em que cada *time step* termina. $F1$ e $F2$ são as forças magnéticas aplicadas em cada êmbolo.

A primeira análise a ser feita será com o Δt igual a zero, portanto ambos os solenoides serão acionados juntos, e ao final do primeiro *time step*, em $1,6ms$, eles são desligados e as forças $F1$ e $F2$ permanecem zeradas até o final da simulação.

As análises seguintes são um pouco mais complicadas, devido à diferença de

Tabela 1: Configuração das forças e timesteps

Δt (ms)	timesteps	1	2	3	4	5	6	7
0	t (ms)	1,6	1,7	10				
	F1 (N)	150	0	0				
	F2 (N)	150	0	0				
Δt (ms)	timesteps	1	2	3	4	5	6	7
0,5	t (ms)	0,4	0,5	1,6	1,7	2,1	2,2	10
	F1 (N)	150	150	150	0	0	0	0
	F2 (N)	0	150	150	150	150	0	0
Δt (ms)	timesteps	1	2	3	4	5	6	7
1	t (ms)	0,9	1	1,6	1,7	2,6	2,7	10
	F1 (N)	150	150	150	0	0	0	0
	F2 (N)	0	150	150	150	150	0	0
Δt (ms)	timesteps	1	2	3	4	5	6	7
1,5	t (ms)	1,4	1,5	1,6	1,7	3,1	3,2	10
	F1 (N)	150	150	150	0	0	0	0
	F2 (N)	0	150	150	150	150	0	0
Δt (ms)	timesteps	1	2	3	4	5	6	7
2	t (ms)	1,6	1,7	1,9	2	3,6	3,7	10
	F1 (N)	150	0	0	0	0	0	0
	F2 (N)	0	0	0	150	150	0	0
Δt (ms)	timesteps	1	2	3	4	5	6	7
2,5	t (ms)	1,6	1,7	2,4	2,5	4,1	4,2	10
	F1 (N)	150	0	0	0	0	0	0
	F2 (N)	0	0	0	150	150	0	0
Δt (ms)	timesteps	1	2	3	4	5	6	7
3	t (ms)	1,6	1,7	2,9	3	4,6	4,7	10
	F1 (N)	150	0	0	0	0	0	0
	F2 (N)	0	0	0	150	150	0	0

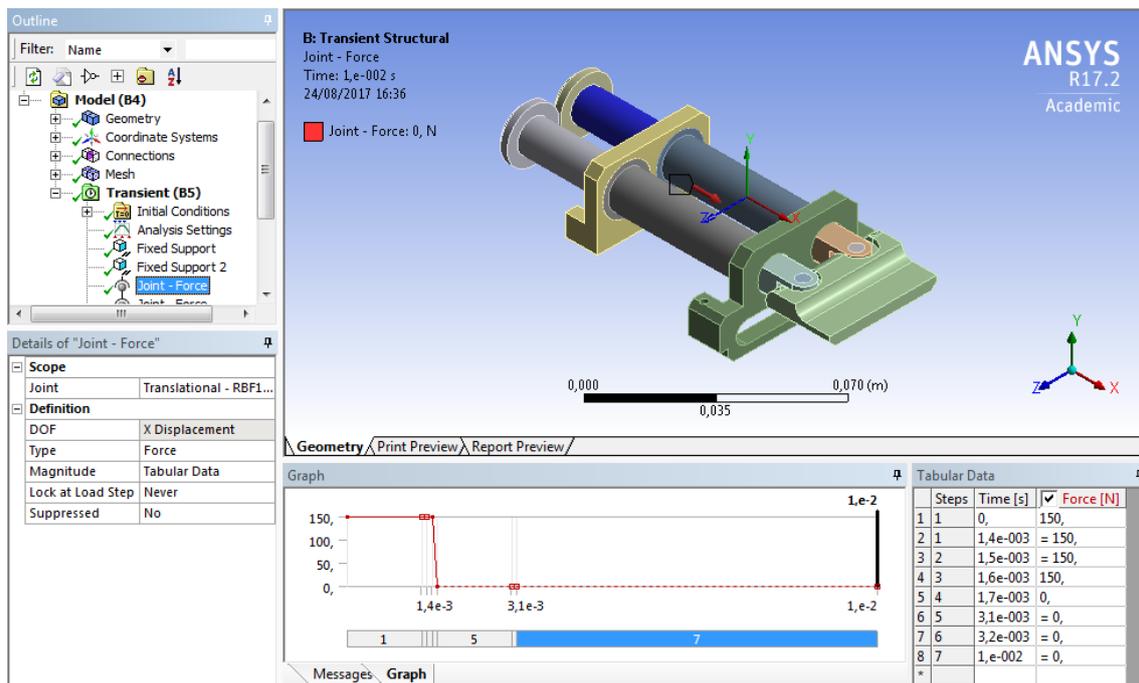
Fonte: Autor

tempo entre o acionamento de cada solenoide, porém seguem o mesmo princípio: cada força é aplicada durante o mesmo período de $1,6ms$ e com um intervalo entre cada acionamento igual a Δt .

A maneira mais prática de implementar as forças $F1$ e $F2$ na simulação é usando as juntas configuradas anteriormente para aplicar essas cargas. Como pode ser observado na Figura 21, a força $F1$ é aplicada como uma carga relativa no eixo x entre o carretel e o êmbolo e sua intensidade varia de acordo com os *time steps*.

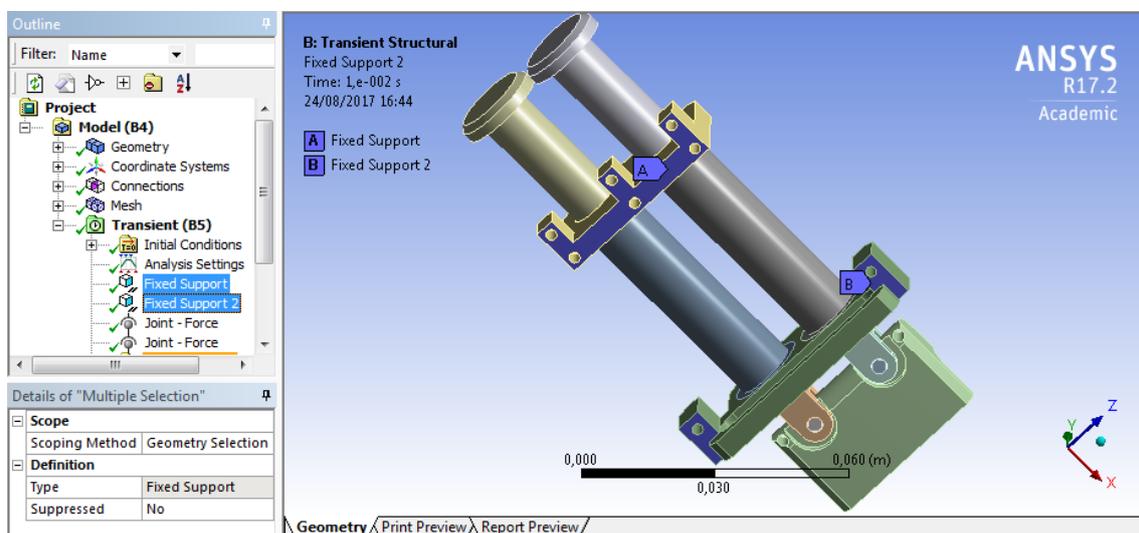
Além das forças aplicadas em cada êmbolo, outra condição de contorno do mecanismo é o seu apoio. A parte do conjunto que é fixada no resto da estrutura do robô são as superfícies inferiores do suporte do solenoide dianteiro e traseiro, portanto foi aplicado a condição de "Fixed Support" nessas faces, como pode-se observar na Figura 22.

Figura 21: Configuração da força aplicada na junta



Fonte: Autor

Figura 22: Configuração das superfícies de apoio



Fonte: Autor

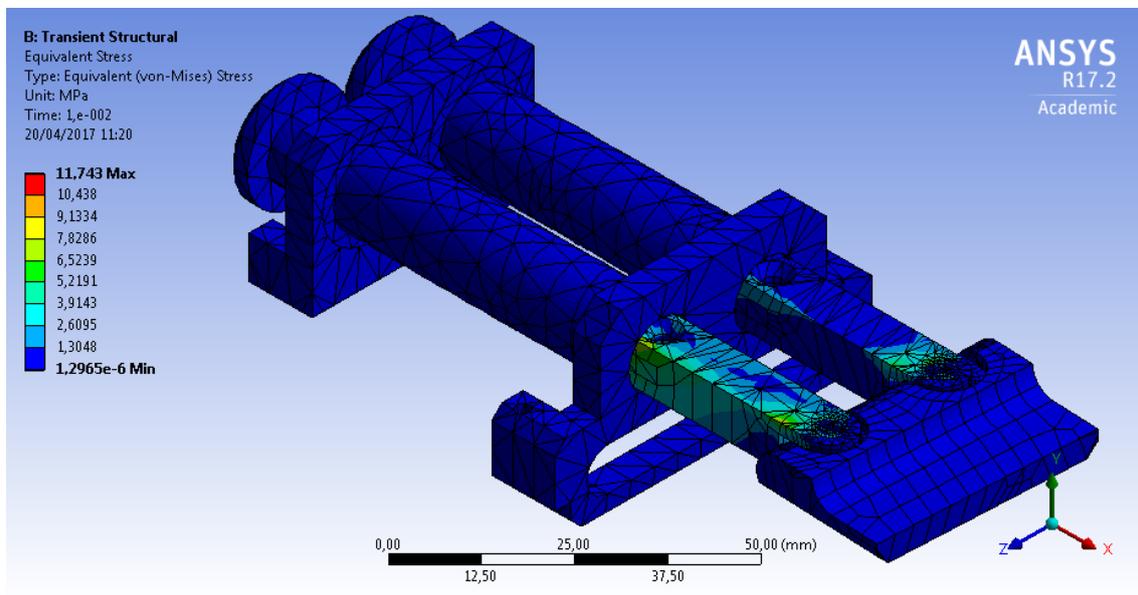
3.3.1.5 Solução

A última etapa da configuração da simulação consiste em informar ao software o que o usuário deseja como resposta, ou seja, quais parâmetros ele deve avaliar e mostrar como resposta.

Para as simulações desse projeto, os aspectos a serem avaliados são os esforços mecânicos sofridos por cada uma das peças envolvidas no funcionamento do mecanismo e também qual o ângulo de chute obtido.

Uma maneira de se obter os esforços mecânicos é através de um diagrama de contorno que discrimine a tensão equivalente de Von-Mises. Esse tipo de diagrama desenha em todas as superfícies do modelo um esquema de cores que indica as tensões superficiais, cuja intensidade pode ser conferida através da legenda no canto. Pode-se observar pela Figura 23 que é fácil identificar os pontos mais solicitados de cada parte individualmente e do mecanismo como um todo.

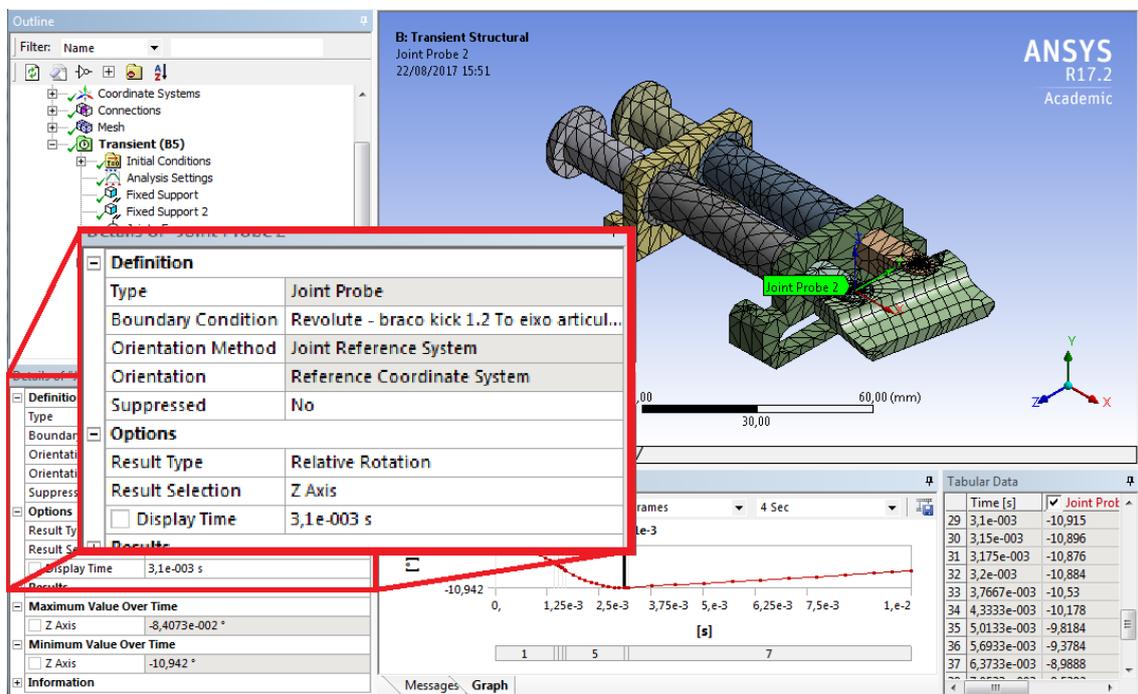
Figura 23: Diagrama de tensões



Fonte: Autor

Para obter-se o ângulo de chute foi usado uma sonda na junta que liga o pino da articulação ao kick. A Figura 24 mostra o setup dessa sonda, a qual foi configurada para retornar o valor do ângulo observado no movimento relativo de rotação entre as duas peças envolvidas.

Figura 24: Configuração da sonda



Fonte: Autor

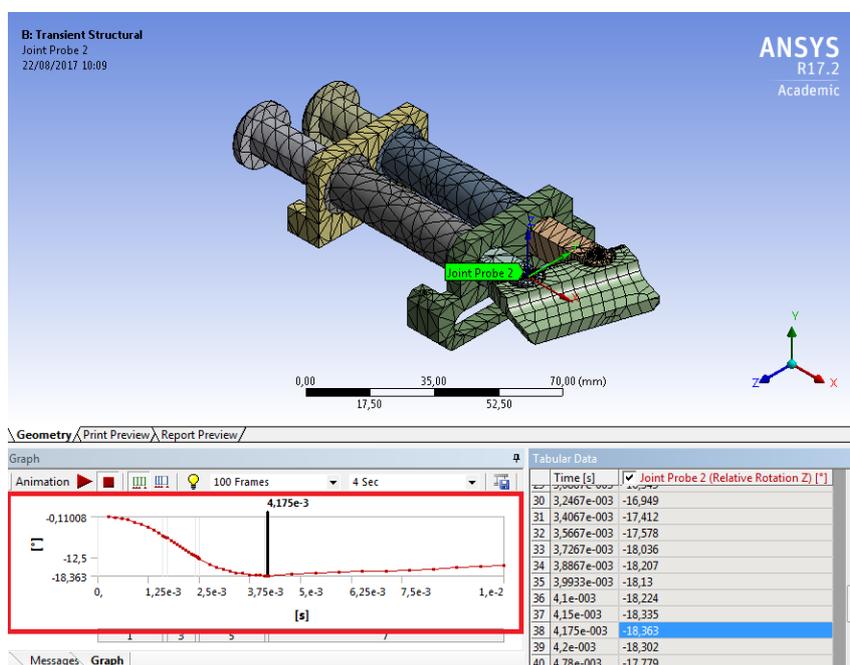
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram obtidas informações importantes quanto às tensões sofridas pelas peças e quanto ao ângulo resultante em cada simulação, que serão tratadas separadamente. Além disso, o mecanismo foi fabricado, testado e colocado em prática na RoboCup 2017, no Japão.

4.1 ÂNGULO DE CHUTE

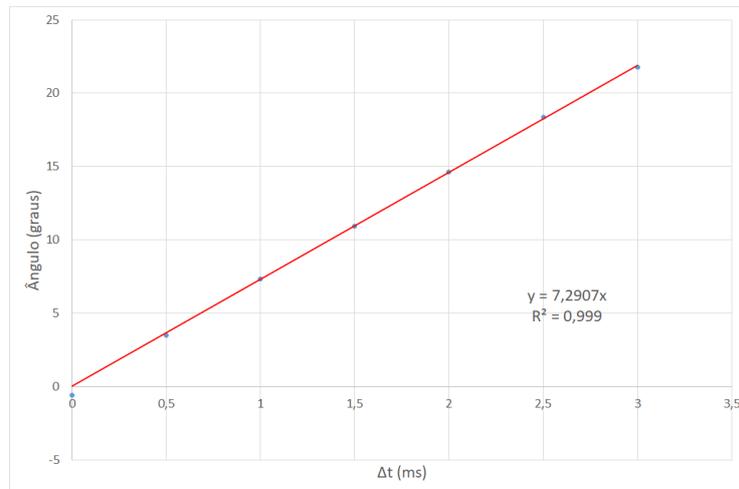
Como podemos ver no gráfico da parte inferior da Figura 25, da sexta simulação ($\Delta t = 2,5ms$) o ângulo de chute atinge seu valor máximo e em seguida se mantém praticamente constante até o final percurso. Esse mesmo comportamento se repete também para as análises com Δt diferentes. Como em todos os casos o deslocamento em que ocorre o ângulo máximo acontece antes da colisão com a bola, espera-se que o mecanismo consiga uma certa confiabilidade na direção do chute.

Figura 25: Ângulo obtido na simulação $\Delta t = 2,5ms$



Fonte: Autor

Além disso, como pode-se observar no gráfico da Figura 26, a relação entre o ângulo de chute e o Δt segue uma forte tendência linear.

Figura 26: Gráfico Δt x Ângulo de chute

Fonte: Autor

A reta traçada nesse gráfico é uma aproximação aos pontos obtidos, cuja equação é uma função linear dada por: $y = 7,2907x$, e a constante R^2 estando tão próxima de 1 indica que é uma excelente aproximação. Podemos substituir y pelo ângulo de chute θ e x por Δt , obtendo a função:

$$\theta = 7,2907\Delta t \quad (23)$$

Tal função deve ser testada para verificar se o funcionamento do mecanismo real seguirá essa mesma tendência e caso isso seja verdade, futuramente essa equação será utilizada na estratégia da equipe para calcular o Δt necessário para se obter o ângulo de chute desejado.

Outras imagens das simulações realizadas podem ser observadas no apêndice.

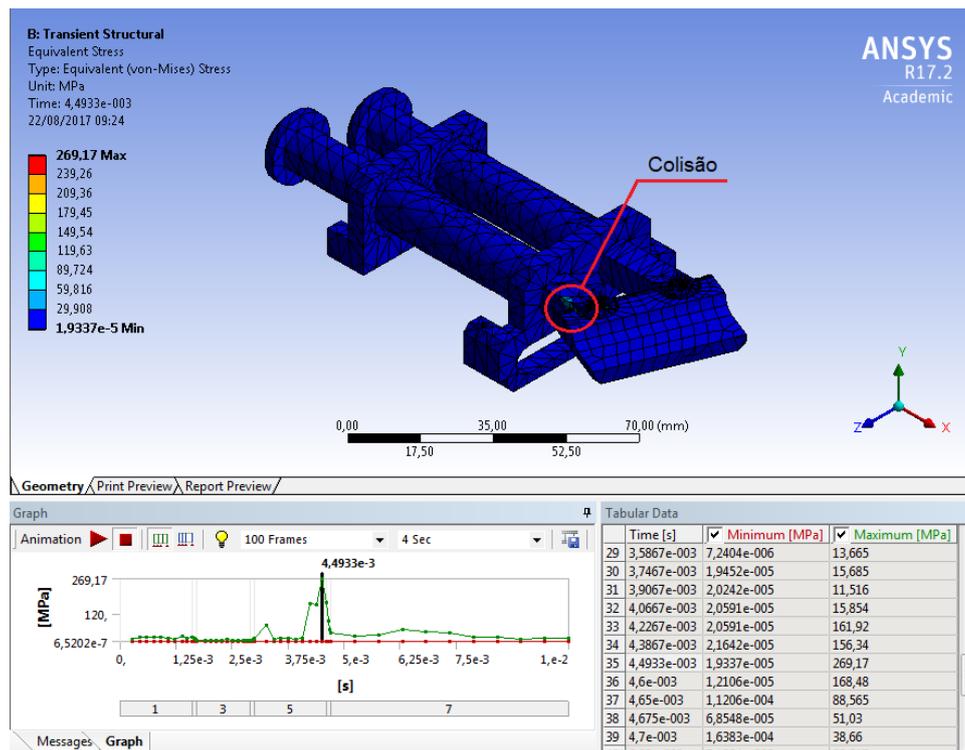
4.2 TENSÕES EQUIVALENTES

Em geral, as tensões obtidas se mostraram bem localizadas e em pontos específicos do mecanismo. Em todos os casos, as regiões mais solicitadas foram no contato entre o pino da articulação e o braço do kick ou entre o pino e o próprio kick.

A Figura 27 a seguir mostra o diagrama de tensões da simulação com $\Delta t = 3ms$ na qual foi observada o maior valor de tensão, com um pico de 269 MPa que ocorreu

no pino da articulação. Embora o pino seja feito de aço, essa tensão é relativamente elevada e pode provocar deformações com o uso repetitivo, contudo o ângulo obtido nessa análise excedeu o limite para o qual o mecanismo foi projetado e conseqüentemente houve colisão entre o braço do kick e o próprio kick devido à angulação excessiva, como pode ser observado na figura.

Figura 27: Simulação $\Delta t = 3ms$ - tensões observadas e colisão



Fonte: Autor

A Tabela 2, relaciona o pico de tensão observado em cada uma das simulações.

Como a última análise resultou em um valor de tensão muito alto devido à colisão, pretende-se permitir que o Δt varie apenas de $0ms$ até $2ms$ inicialmente, para evitar danos ao mecanismo.

Para $\Delta t = 2,5ms$, embora não se espera que ocorra colisão, a tensão ainda é relativamente alta e pode chegar a causar danos com uma quantidade excessiva de chutes, portanto uma análise de durabilidade pode ser realizada futuramente para verificar se essa configuração é viável.

Tabela 2: Tensão equivalente

$\Delta t(ms)$	Tensão Equivalente (MPa)
0	19,829
0,5	46,096
1	85,669
1,5	64,756
2	95,819
2,5	144,27
3	269,17

Fonte: Autor

4.3 DESENHOS TÉCNICOS, FABRICAÇÃO E MONTAGEM

Uma vez verificado através das análises de elementos finitos que o mecanismo suporta os esforços à que será submetido e que seu funcionamento será adequado, teve início a elaboração dos desenhos técnicos de cada peça.

A Figura 28 mostra o desenho da montagem do mecanismo. O desenho individual de cada peça pode ser encontrado no anexo, no final desse documento.

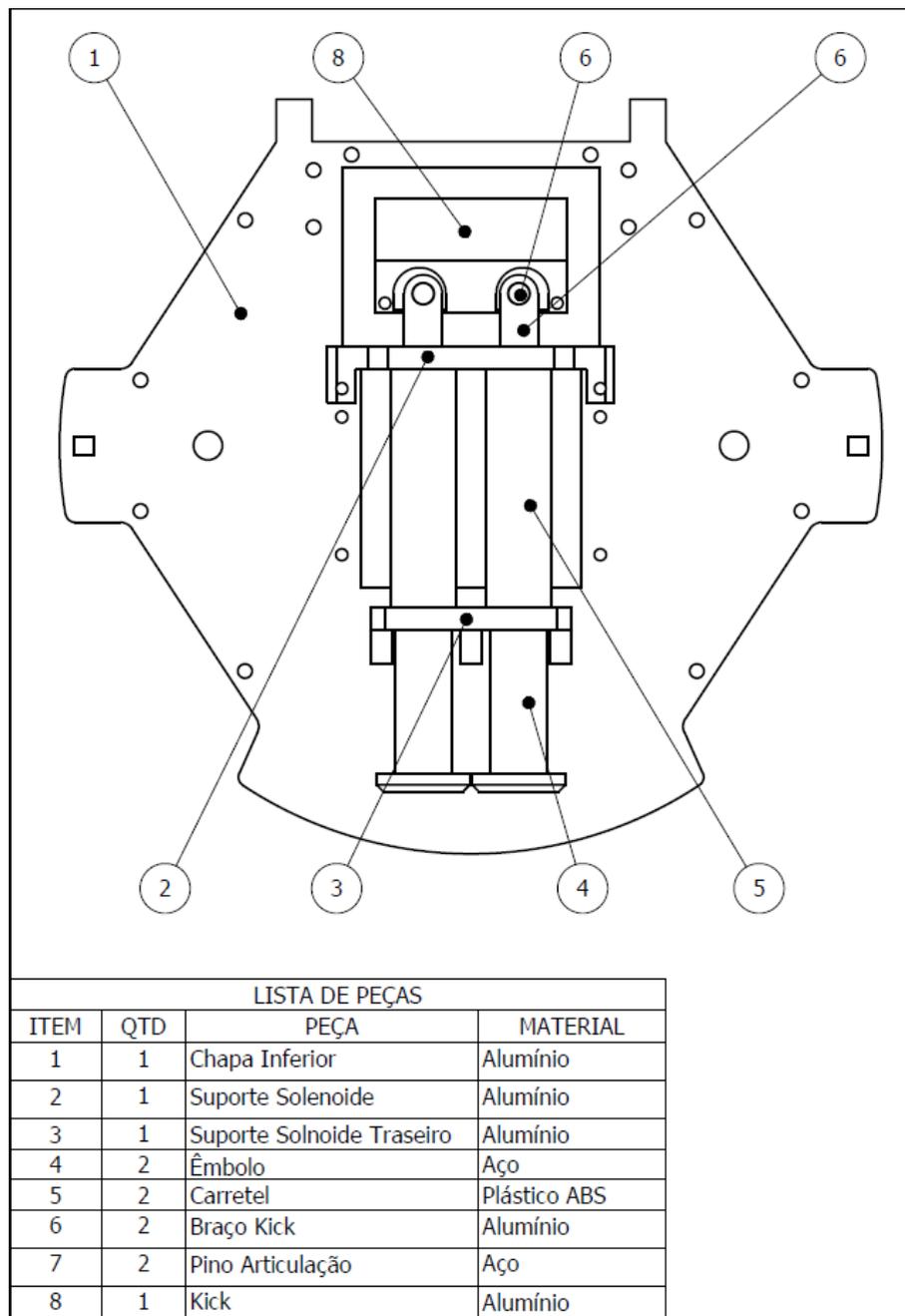
Com todos os desenhos prontos, teve início a fabricação das peças. As peças foram todas produzidas por técnicos qualificados na própria oficina de usinagem da FEI, usando tornos, fresas, ferramentas de eletroerosão e corte a jato d'água.

Finalizadas as etapas de usinagem, foi necessário realizar um pequeno acabamento nas peças usando limas manuais para retirar rebarbas e ajustar tolerâncias. As roscas também foram feitas manualmente, usando machos de tamanho M3.

Em seguida realizou-se o enrolamento do solenoide. Com o auxílio de uma bobinadeira, com um contador de voltas, as 388 espiras de fio AWG 24 foram enroladas em torno do carretel, de forma que permanecessem as mais paralelas possível, como ilustrado na Figura 29.

Por fim o mecanismo foi montado, como mostra a Figura 30 e uma placa eletrônica de testes foi adaptada da placa de chute atual dos robôs pelos alunos Guilherme P. de Oliveira e Iago A. Martins que também fazem parte da equipe.

Figura 28: Desenho da montagem



Fonte: Autor

4.4 TESTES DE FUNCIONALIDADE

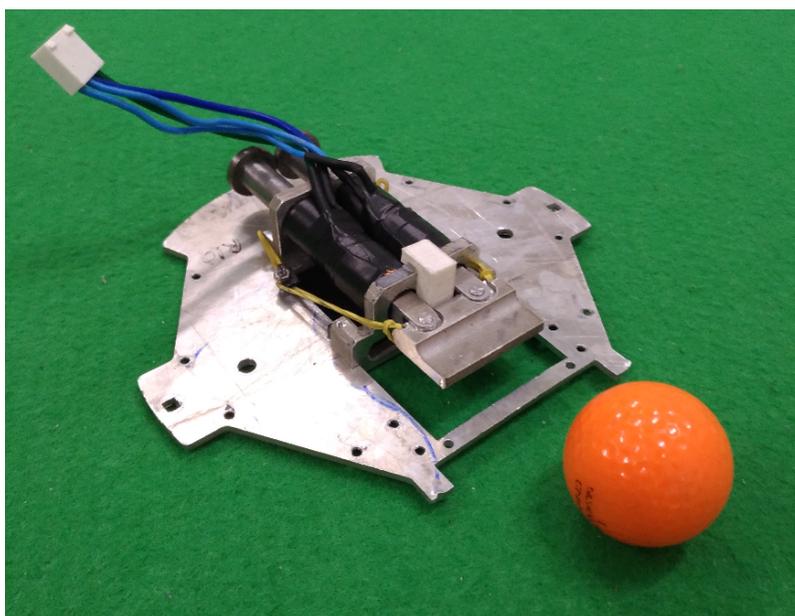
Tendo em mãos o mecanismo montado, foi possível iniciar os testes, porém devido à proximidade da RoboCup 2017, não foi possível realizar todos os testes planejados inicialmente, uma vez que a preparação dos robôs para a competição era uma prioridade e

Figura 29: Foto dos solenoides



Fonte: Autor

Figura 30: Foto da montagem



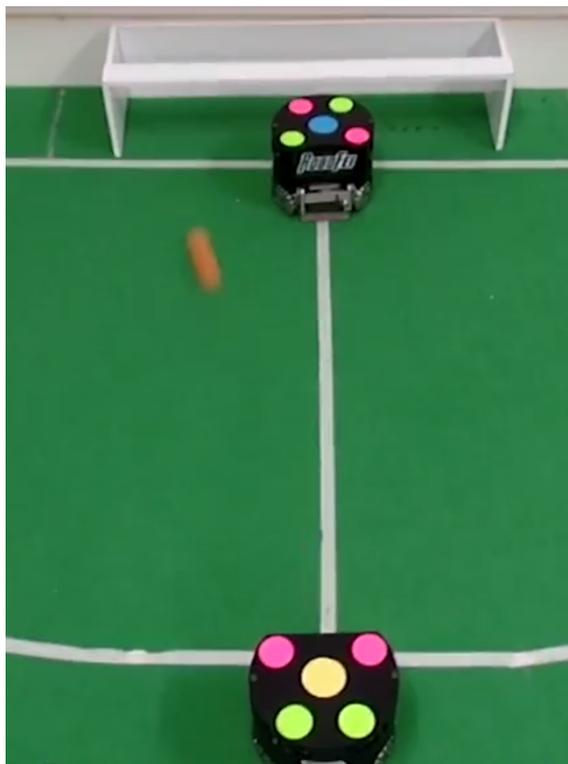
Fonte: Autor

demandava muito tempo dos membros da equipe.

Contudo foi possível realizar alguns testes preliminares e validar o funcionamento do mecanismo. Como pode-se observar na Figura 31, o novo sistema foi capaz de realizar chutes angulados com uma força de lançamento adequada.

Além disso, também foi verificado que o mecanismo consegue ter precisão

Figura 31: Chute angulado

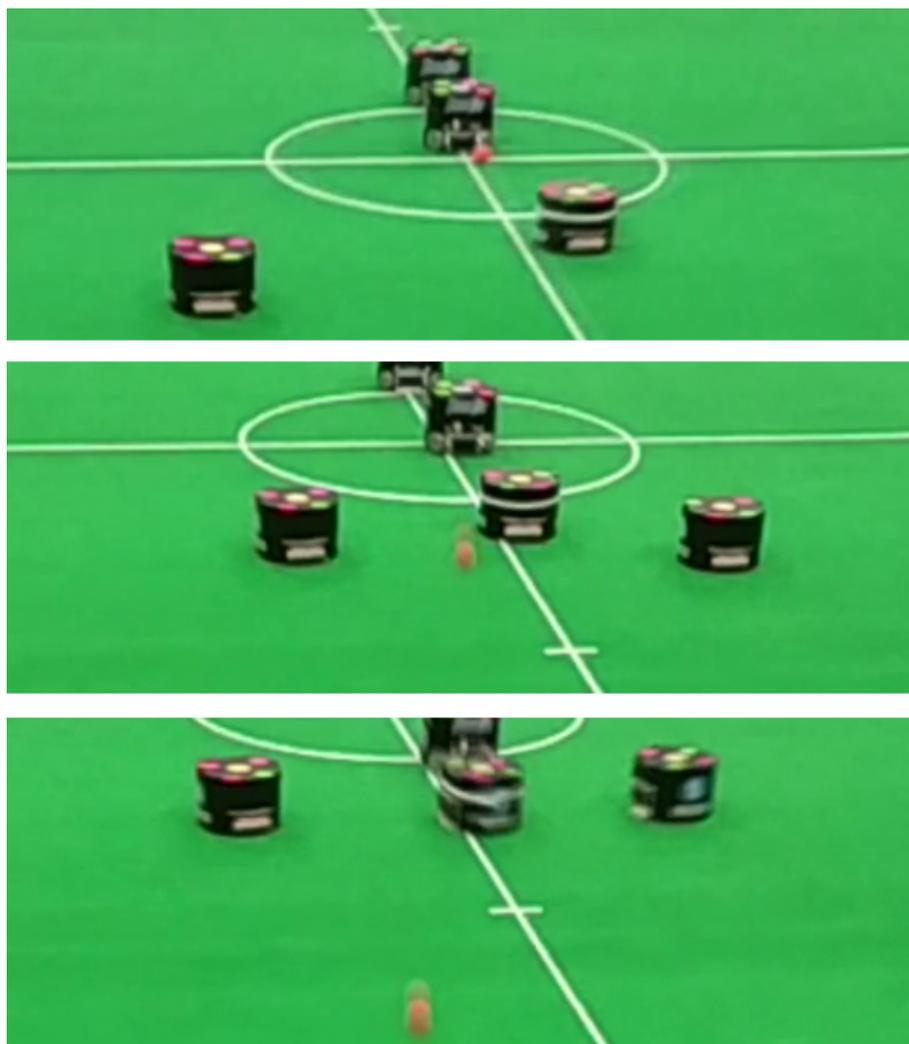


Fonte: Autor

suficiente para realizar um chute reto, ou seja, acionar os dois solenoides exatamente no mesmo tempo.

Mesmo sem os testes de confiabilidade e durabilidade do conjunto e sem uma calibração muito refinada, foi possível montar o protótipo em um dos robôs e leva-lo à RoboCup. Durante a competição no Japão o robô foi capaz de realizar alguns chutes angulados em direção ao gol adversário, como pode-se observar na Figura 32, porém não chegou a marcar nenhum gol.

Figura 32: Chute angulado em jogo



Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

O estudo realizado na revisão bibliográfica forneceu base teórica suficiente para o desenvolvimento inicial do mecanismo. Os conhecimentos em eletromagnetismo foram de suma importância na realização da simulação no software FEMM que estimou a força exercida pelo solenoide durante seu acionamento. Nas simulações estruturais, os conceitos de resistência dos materiais e os trabalhos realizados com o software ANSYS previamente ao longo do curso de engenharia mecânica foram vitais para a correta configuração e a interpretação dos resultados obtidos nas análises.

Assim, de acordo com as simulações, o protótipo virtual não somente era capaz de realizar a tarefa proposta, mas também suportava todos os esforços mecânicos oriundos de tal tarefa. Essa verificação possibilitou a fabricação do mecanismo real sem que fosse necessário dar um tiro no escuro e produzir um protótipo sem ter nenhuma expectativa de seu real funcionamento. Uma vez com o mecanismo finalizado e montado, foi verificado o seu funcionamento. Ele se mostrou capaz de realizar lançamentos angulados para ambos os lados e também tem precisão suficiente para chutar reto. Infelizmente, devido a atrasos mencionados no relatório parcial, uma demora além do esperado para a fabricação das peças e ainda a proximidade com a RoboCup 2017, não foi possível a realização de todos os testes propostos inicialmente nesse projeto de iniciação.

Contudo, o objetivo principal foi atingido: foi desenvolvido um mecanismo capaz de lançar a bola em diferentes direções, independentemente da direção à qual o robô está voltado. Mas ainda há trabalho a ser feito.

Embora essa iniciação científica tenha chegado ao fim, ainda é necessário aprimorar o projeto para que seu uso nas competições seja aperfeiçoado: realizar testes de confiabilidade e durabilidade além de tornar o mecanismo mais compacto e otimizar sua eficiência. Essas e outras tarefas no RoboFEI terão continuidade mesmo com o fim da iniciação científica, pois o contínuo aprimoramento e aprendizado são uma constante no ambiente competitivo da RoboCup e o trabalho não pode parar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SMALL Size League. Página oficial dessa categoria de futebol de robôs. Disponível em: http://wiki.robocup.org/wiki/Small_Size_League. Acesso em: 18 fev. 2016.

ROBOFEI. Desenvolvido pelo Centro Universitário da FEI. Página do time de futebol de robôs da FEI. Disponível em: <http://www.fei.edu.br/robo/>. Acesso em: 18 fev. 2016.

ROBOCUP. Desenvolvido por The Robocup Federation. Site do evento de competições robóticas. Disponível em: <http://www.robocup.org/>. Acesso em: 18 fev. 2016.

INVENTOR. Desenvolvido por Autodesk, Inc. Site oficial do software. Disponível em: <http://www.autodesk.com.br/products/inventor/overview>. Acesso em: 18 fev. 2016.

STOX'S. Página da equipe colombiana de futebol de robôs. Disponível em: <http://www.stoxs.org/>. Acesso em: 7 mar. 2016.

KIKS. Página da equipe japonesa de futebol de robôs. Disponível em: <http://www.ee.toyota-ct.ac.jp/sugi/RoboCup.html>. Acesso em: 7 de mar de 2016.

RODRIGUEZ, Saith et al. STOX's 2014 Extended Team Description Paper, Universidad São Tomás, Bogotá, 2014. Disponível em: http://wiki.robocup.org/wiki/File:Small_Size_League_-_RoboCup_2014_-_ETDP_STOX%E2%80%99s.pdf. Acesso em: 7 de mar de 2016.

SUGIURA, Toko et al. KIKS 2010 Extended Team Description, Toyota National College of Technology, Toyota, 2010. Disponível em: http://wiki.robocup.org/wiki/File:Small_Size_League_-_RoboCup_2010_-_ETDP_KIKS.pdf. Acesso em: 7 de mar de 2016.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de Física: Eletromagnetismo, 9. ed. São Paulo: LTC, 2012.

HIBBELER, R.C. Dinâmica: Mecânica para Engenharia, 12. ed. São Paulo: Pearson, 2001.

WORKBENCH Platform. Desenvolvido por ANSYS, Inc. Site oficial do software. Disponível em: <http://www.ansys.com/Products/Platform>. Acesso em 18 fev. 2016.

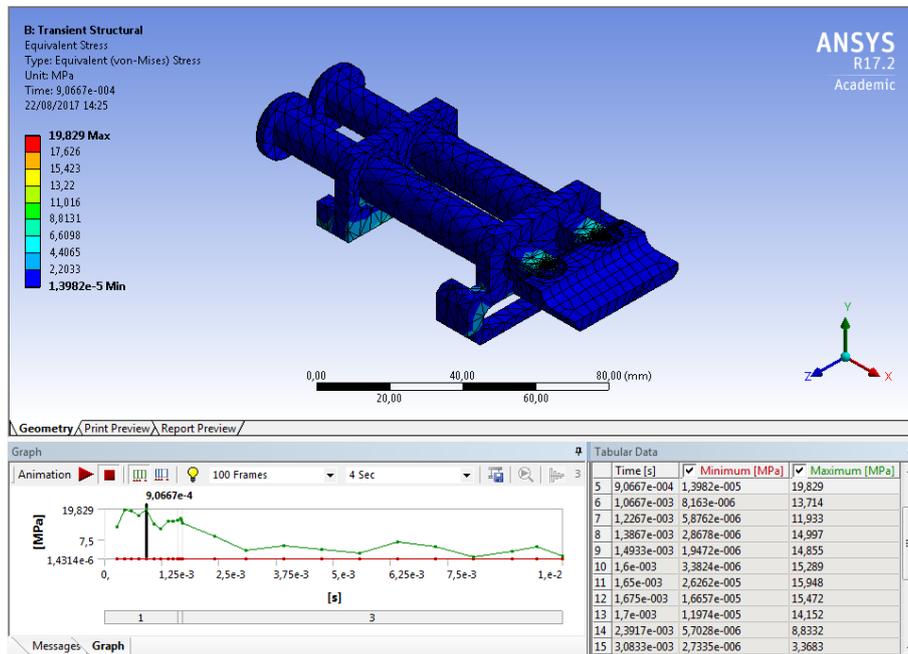
CALLISTER, Willian D. Ciência e engenharia de materiais, 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

MEEKER, David. Finite Element Method Magnetics Home Page. Site oficial do software FEMM. Disponível em: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>. Acesso em 10 de ago de 2016.

MILLER, Eric. Mapped Face Meshing in ANSYS Workbench, PADT, Inc. - The Blog. Disponível em: <http://www.padtinc.com/blog/the-focus/mapped-face-meshing-in-ansys-workbench>. Acesso em 18 de março de 2017.

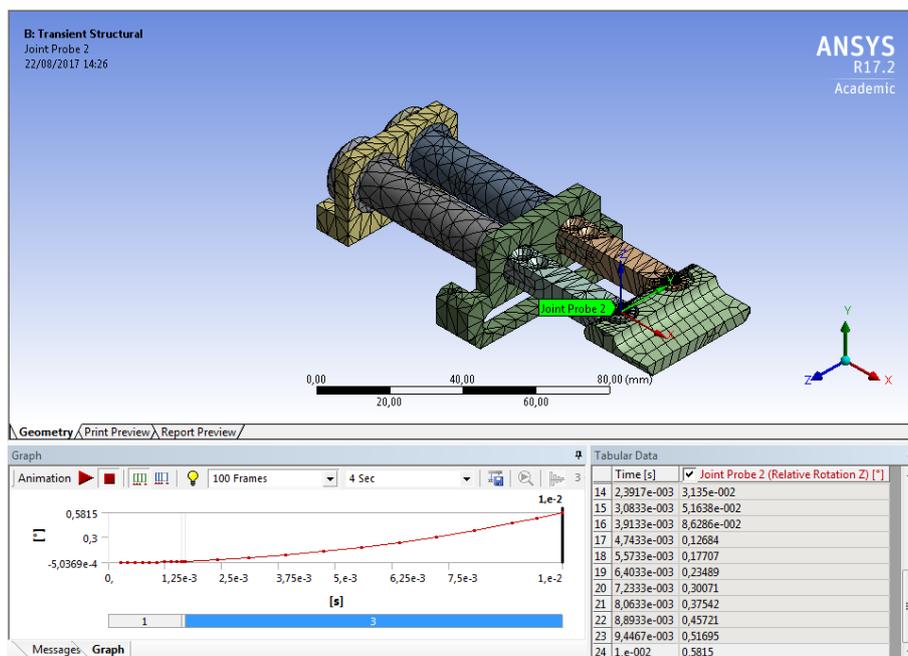
APÊNDICE

Figura 33: Diagrama de Tensões para $\Delta t = 0$

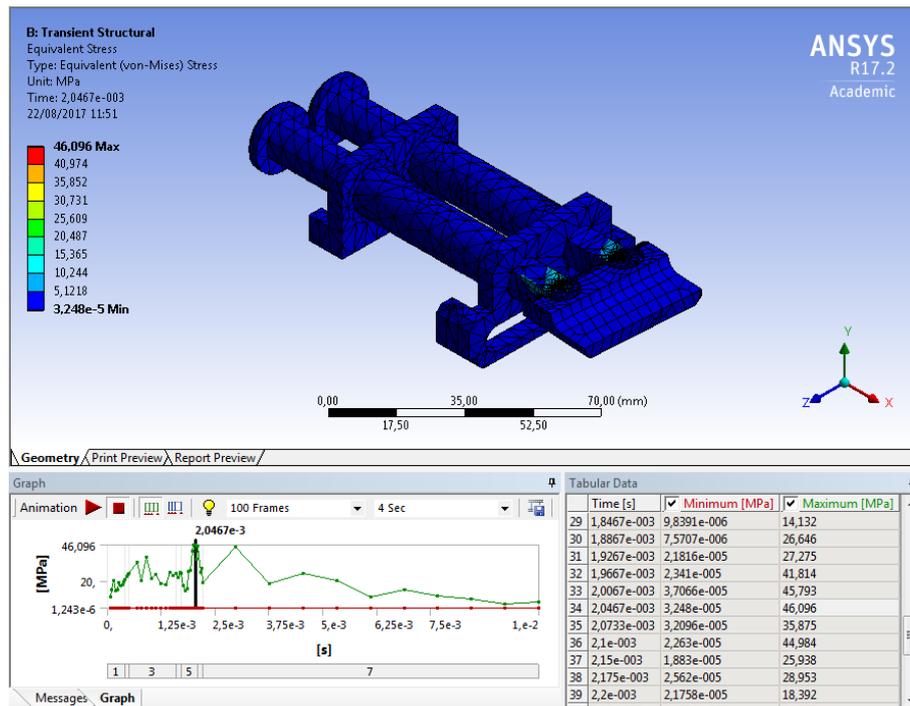


Fonte: Autor

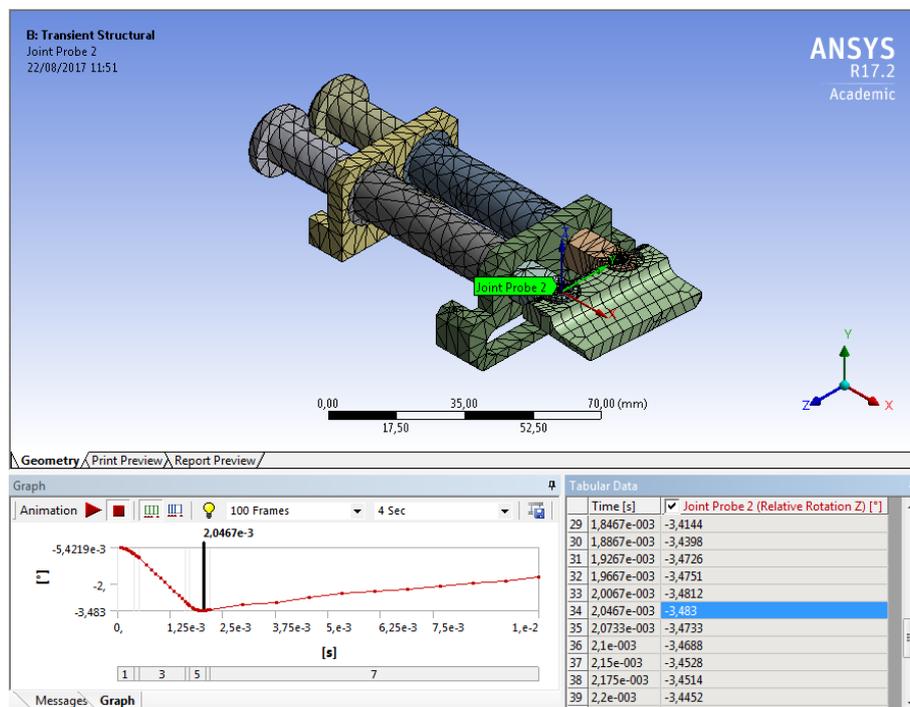
Figura 34: Ângulo resultante para $\Delta t = 0$



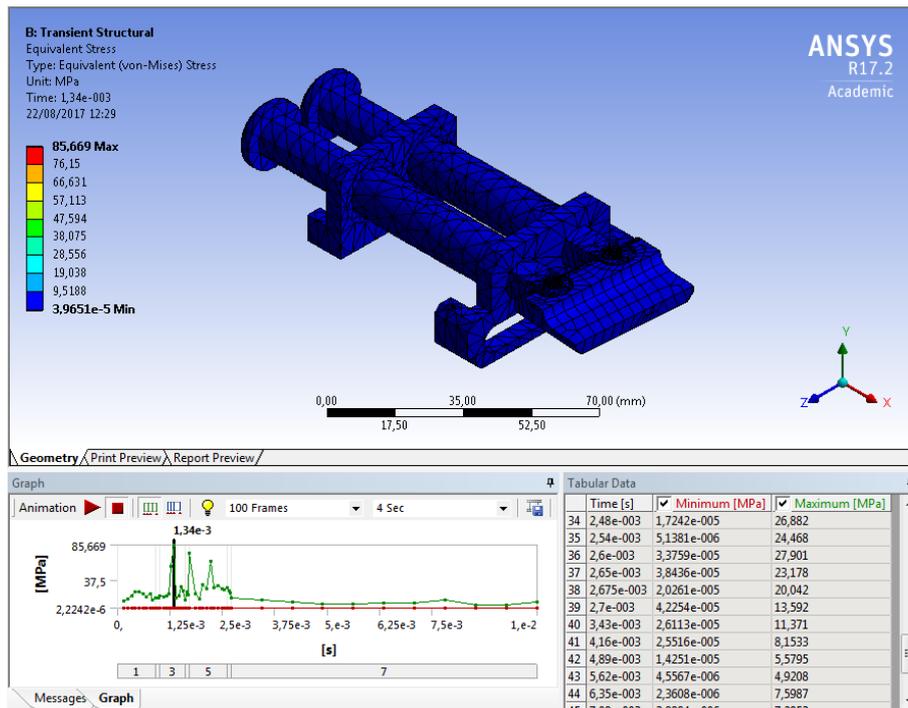
Fonte: Autor

Figura 35: Diagrama de Tensões para $\Delta t = 0,5ms$ 

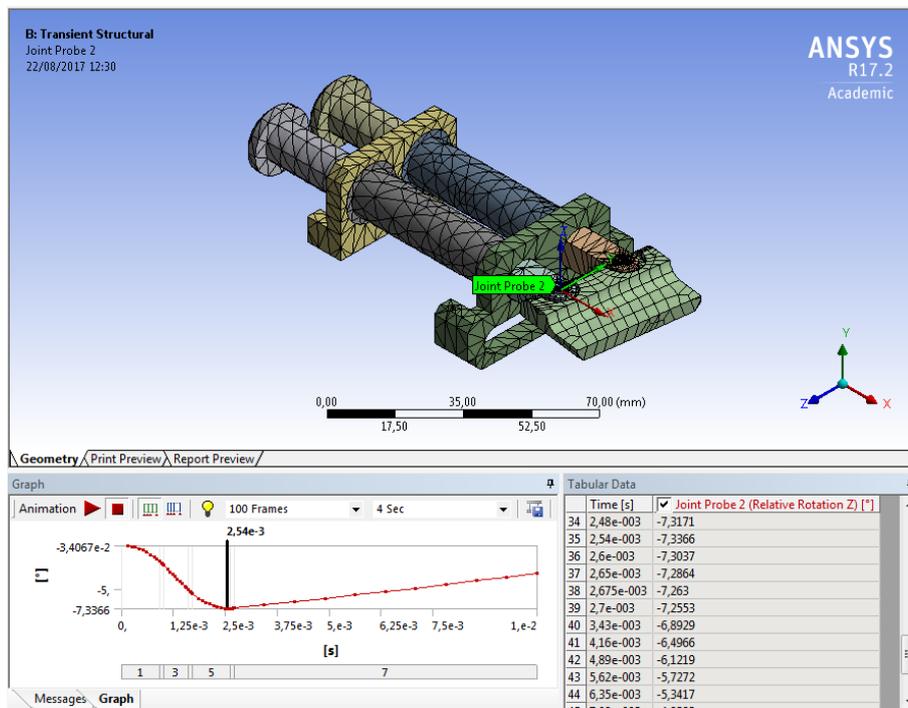
Fonte: Autor

Figura 36: Ângulo resultante para $\Delta t = 0,5ms$ 

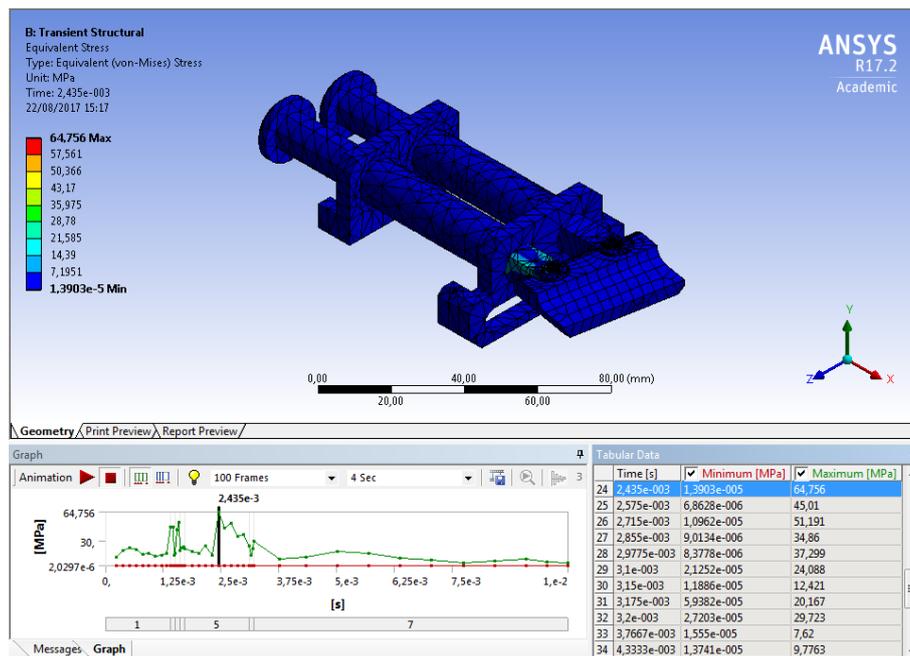
Fonte: Autor

Figura 37: Diagrama de Tensões para $\Delta t = 1ms$ 

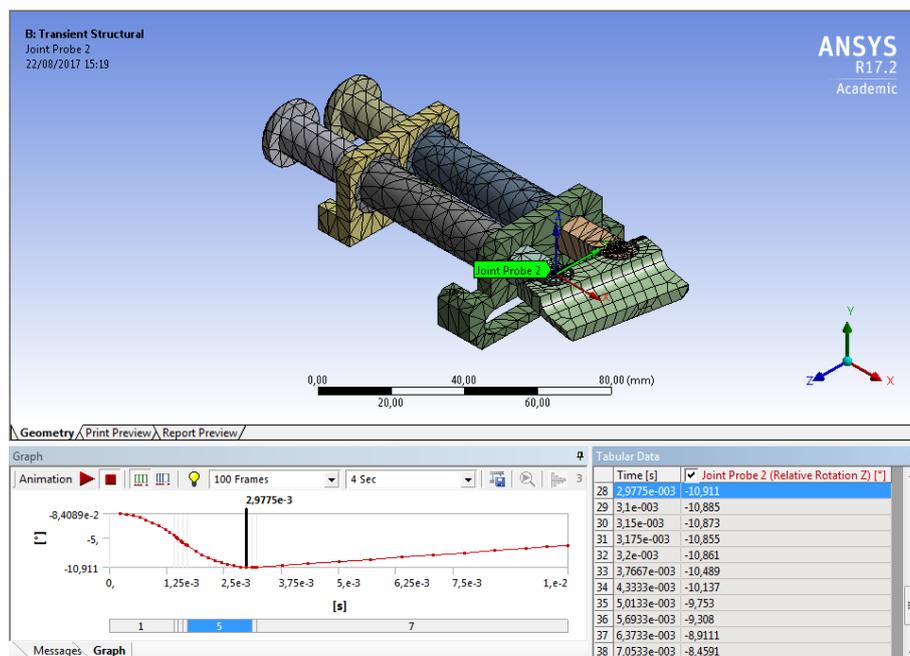
Fonte: Autor

Figura 38: Ângulo resultante para $\Delta t = 1ms$ 

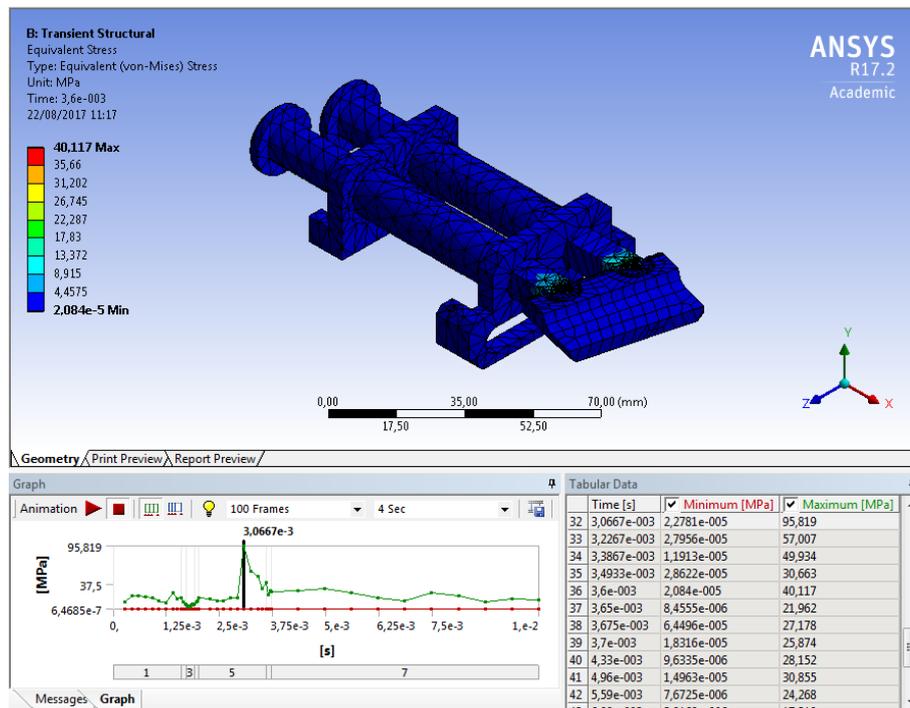
Fonte: Autor

Figura 39: Diagrama de Tensões para $\Delta t = 1,5ms$ 

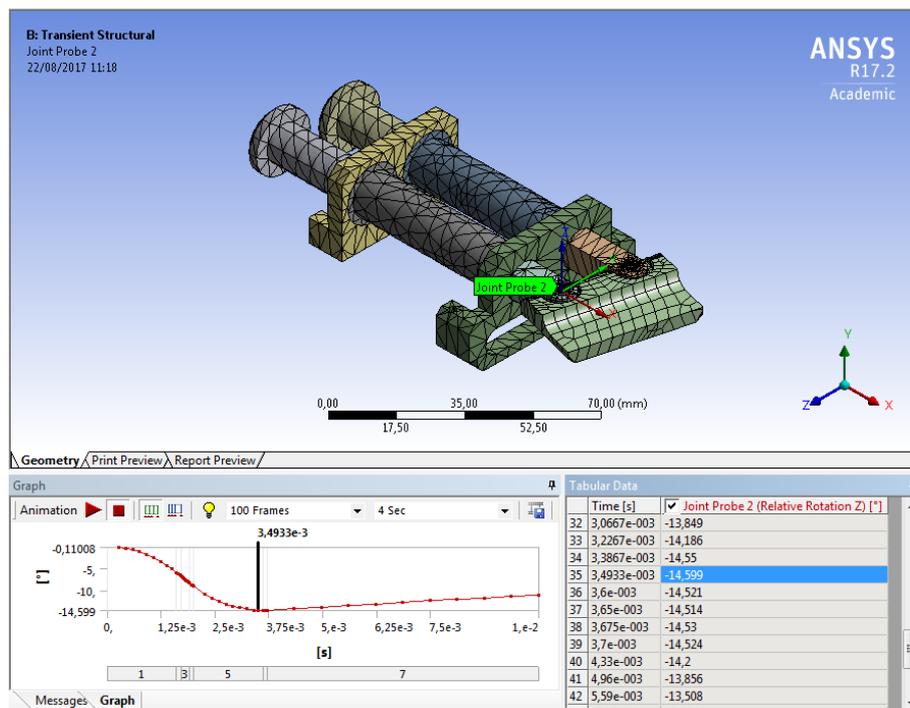
Fonte: Autor

Figura 40: Ângulo resultante para $\Delta t = 1,5ms$ 

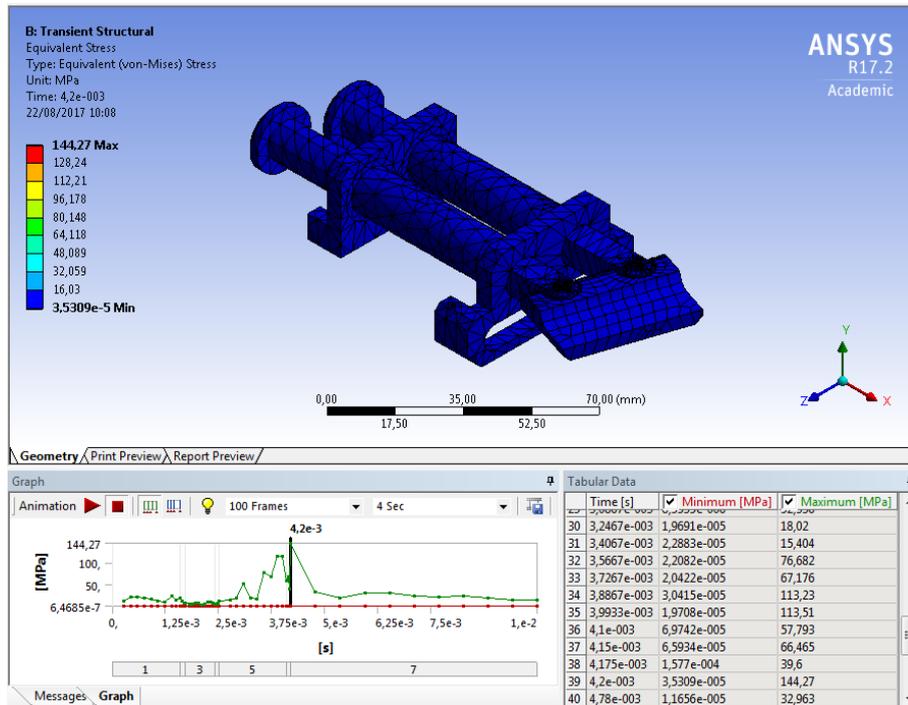
Fonte: Autor

Figura 41: Diagrama de Tensões para $\Delta t = 2ms$ 

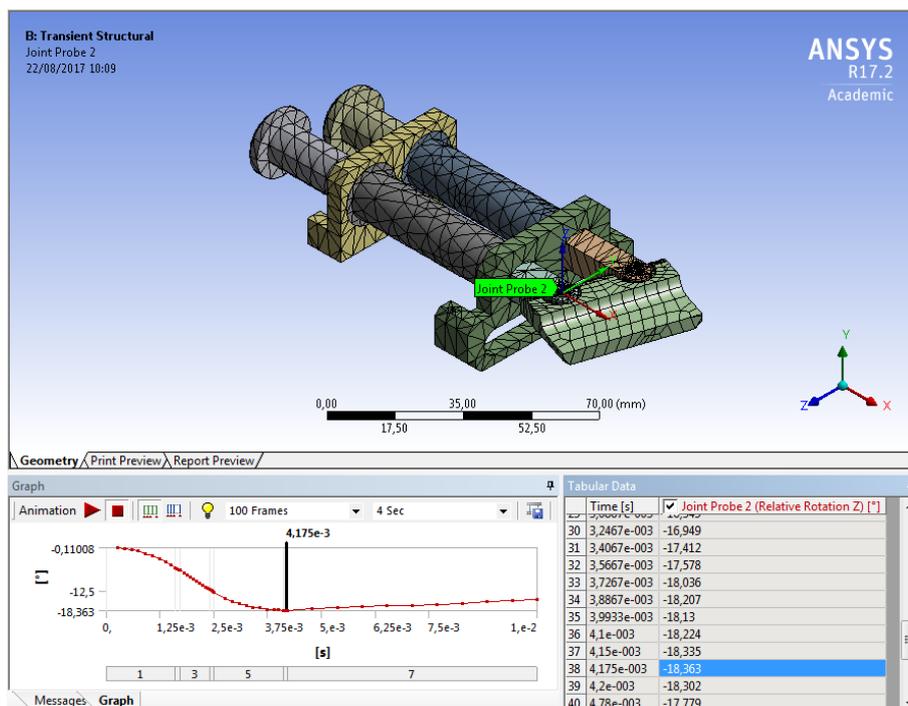
Fonte: Autor

Figura 42: Ângulo resultante para $\Delta t = 2ms$ 

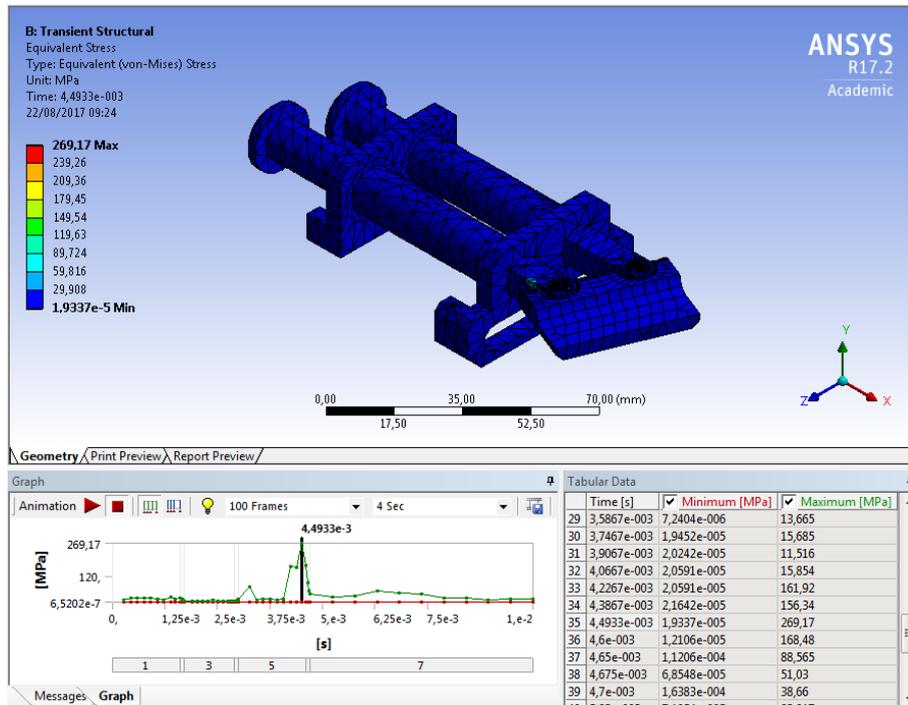
Fonte: Autor

Figura 43: Diagrama de Tensões para $\Delta t = 2,5ms$ 

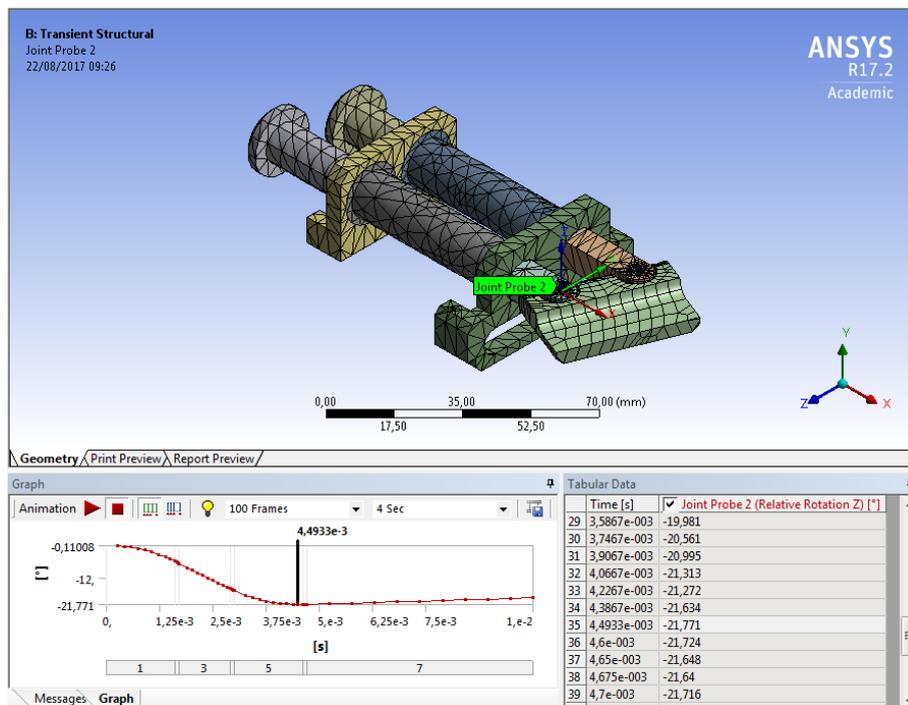
Fonte: Autor

Figura 44: Ângulo resultante para $\Delta t = 2,5ms$ 

Fonte: Autor

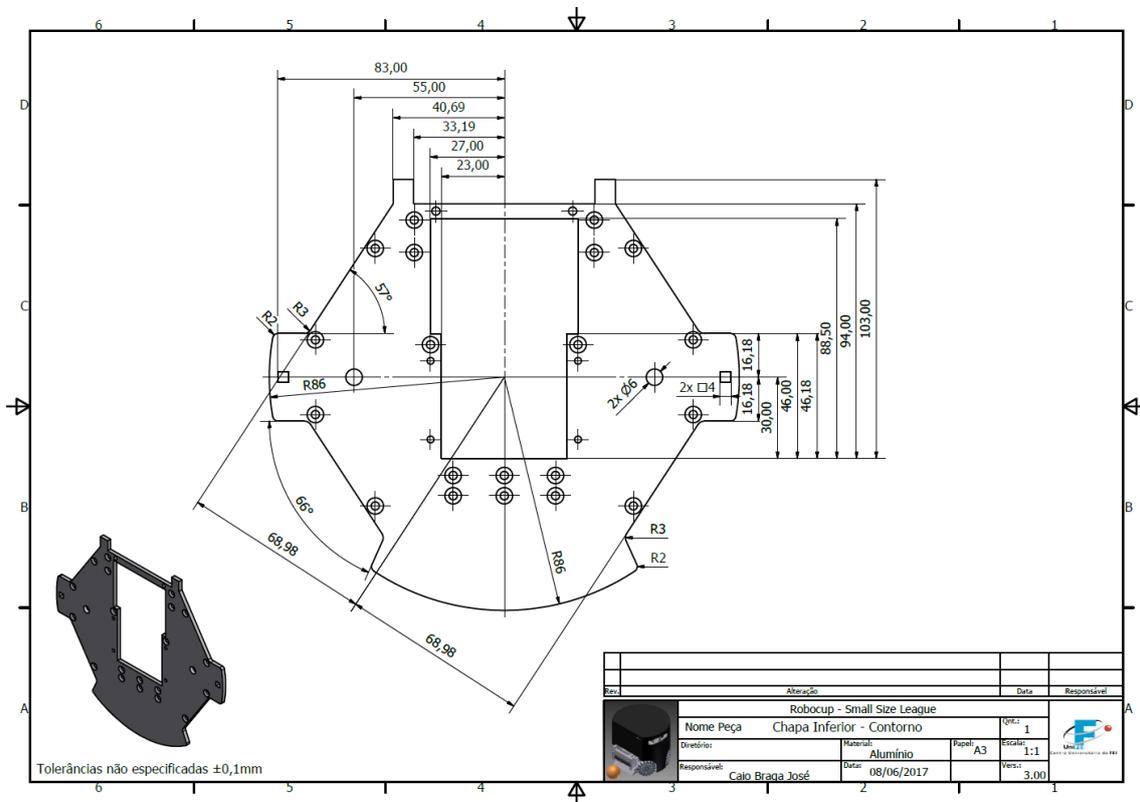
Figura 45: Diagrama de Tensões para $\Delta t = 3ms$ 

Fonte: Autor

Figura 46: Ângulo resultante para $\Delta t = 3ms$ 

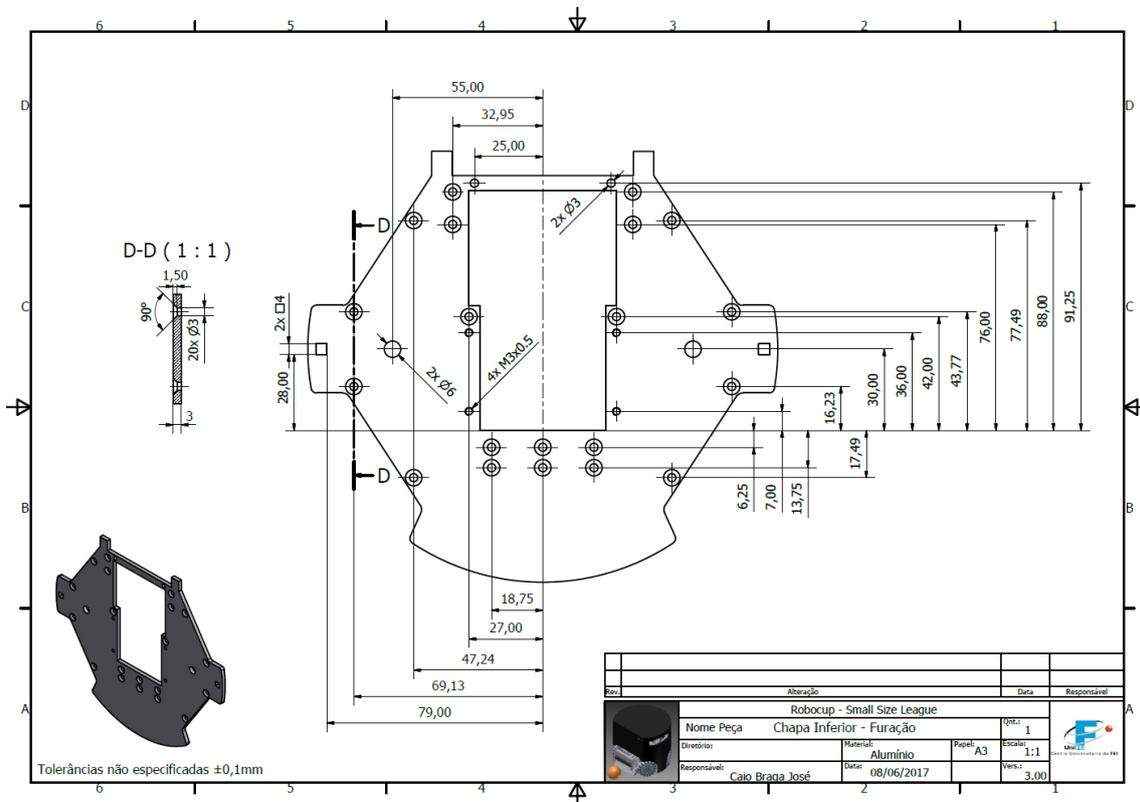
Fonte: Autor

Figura 47: Desenho - Chapa Inferior - Contorno



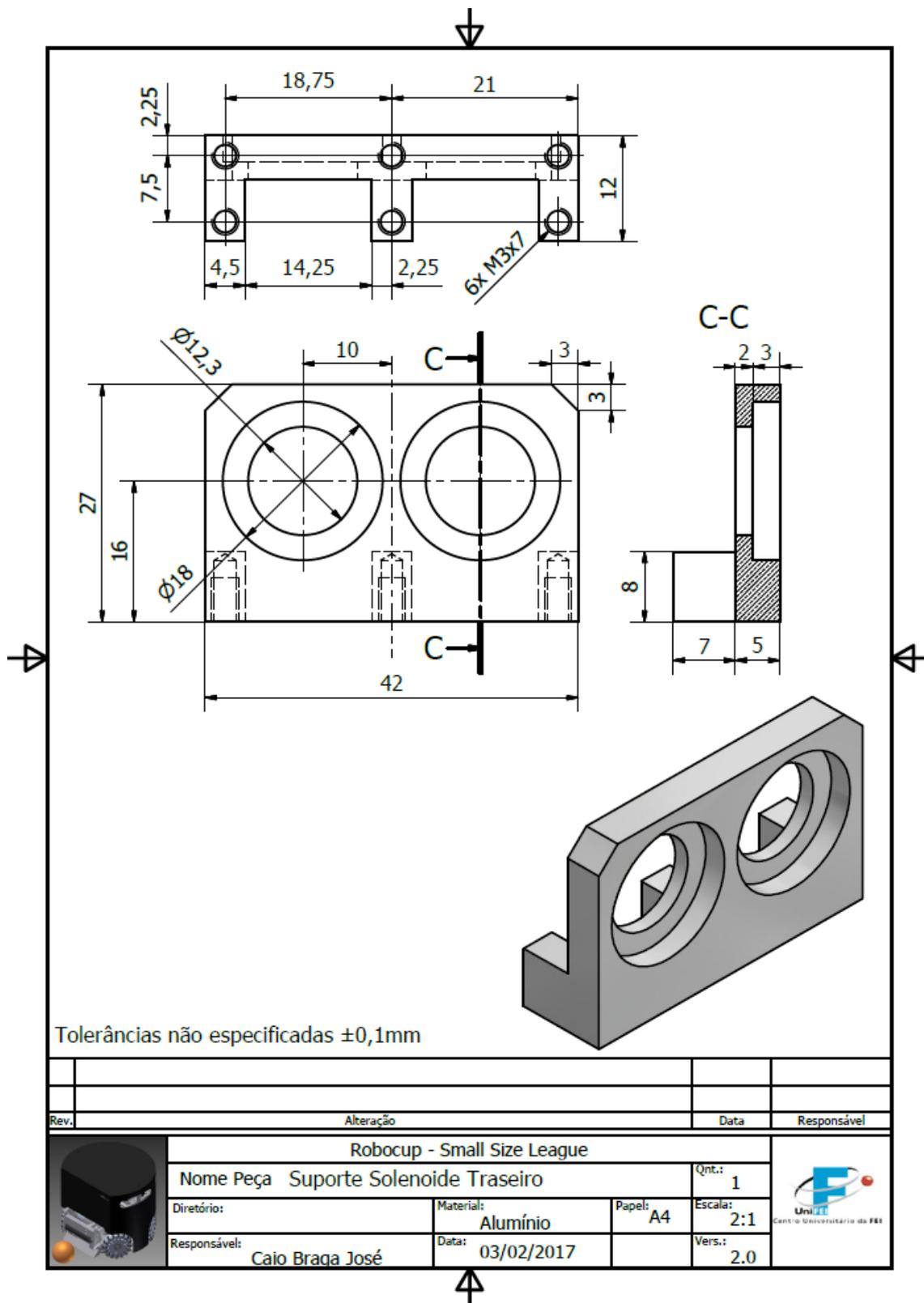
Fonte: Autor

Figura 48: Desenho - Chapa Inferior - Furação



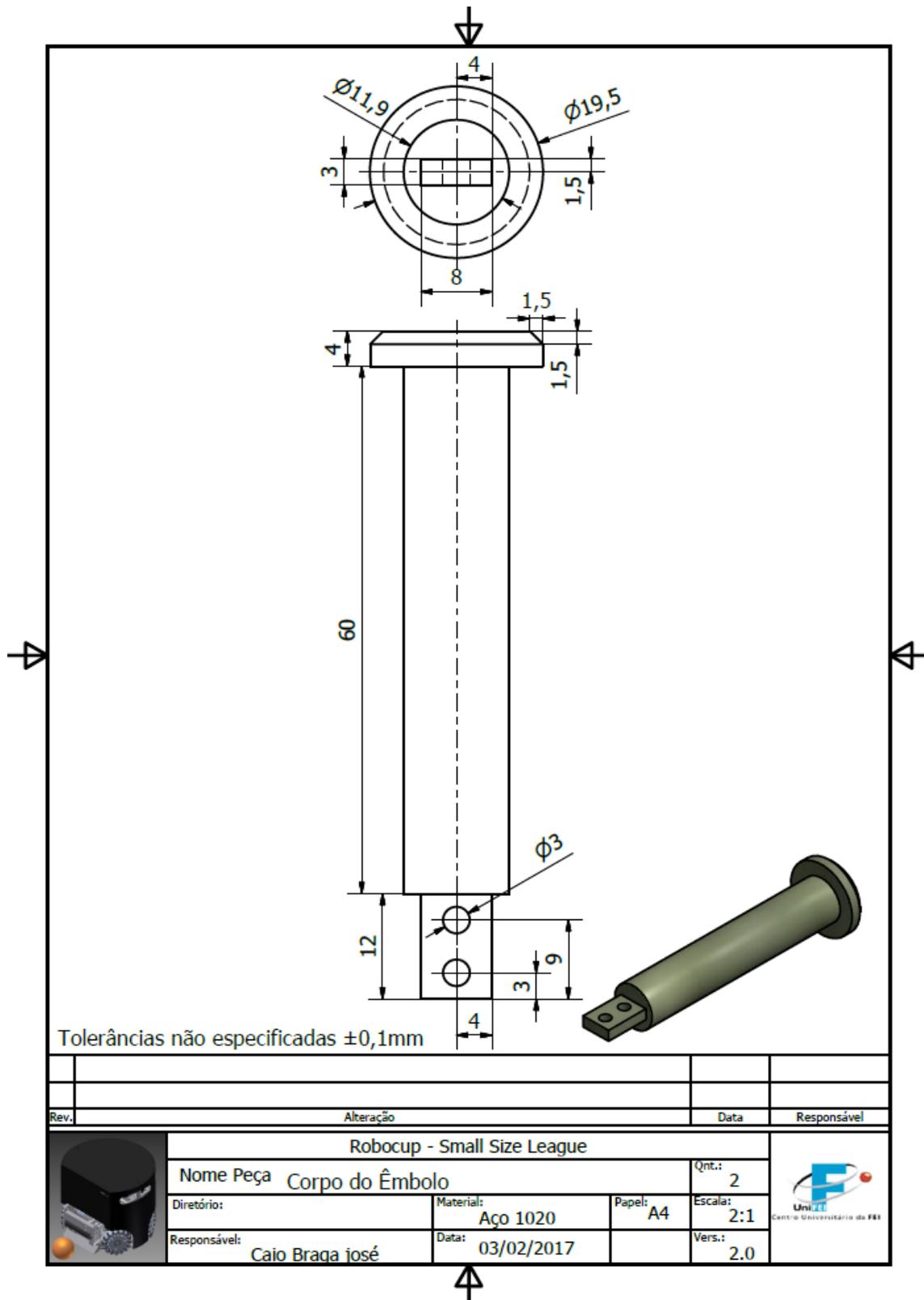
Fonte: Autor

Figura 50: Desenho - Suporte Solenoide Traseiro



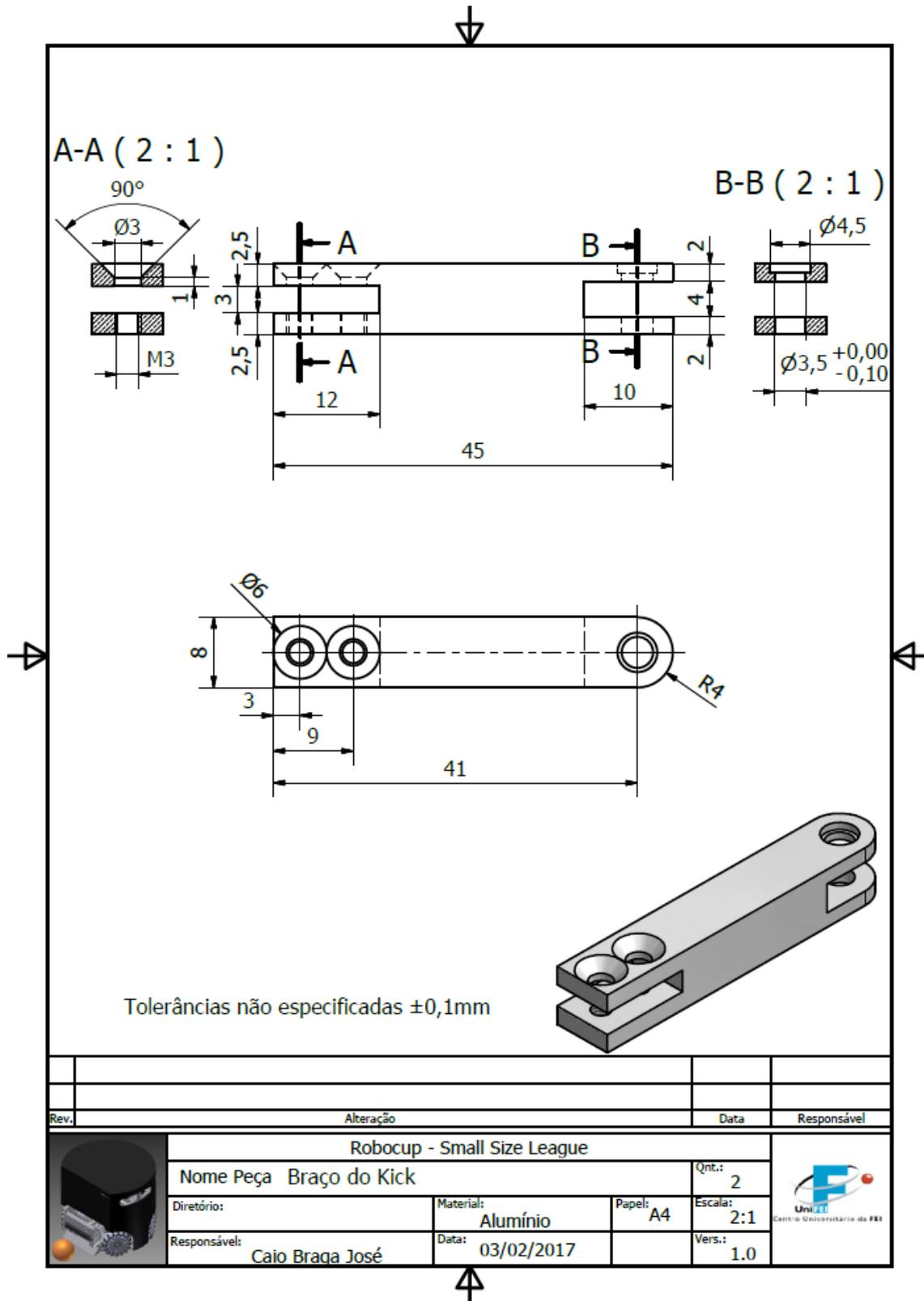
Fonte: Autor

Figura 51: Desenho - Êmbolo



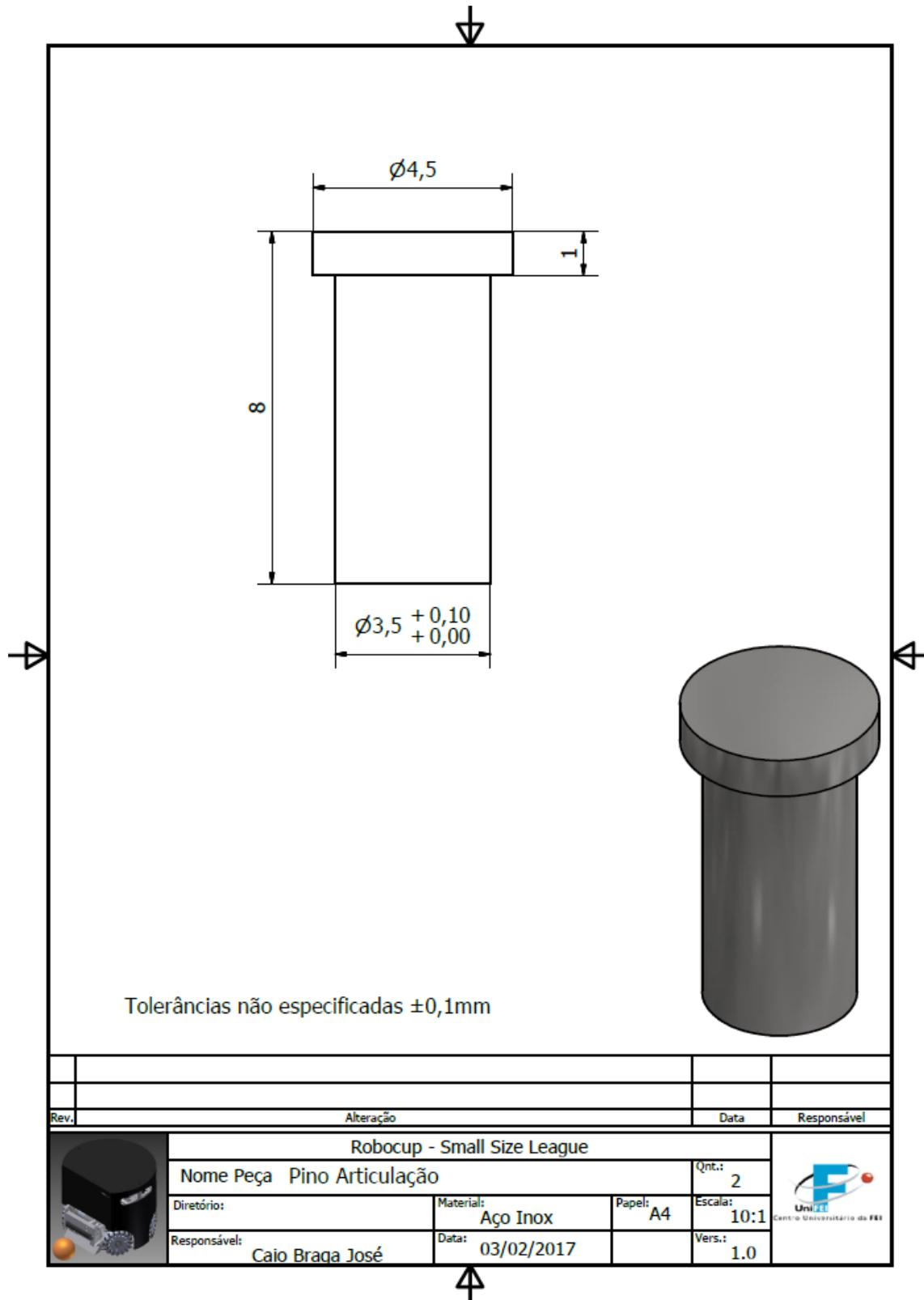
Fonte: Autor

Figura 52: Desenho - Braço do Kick



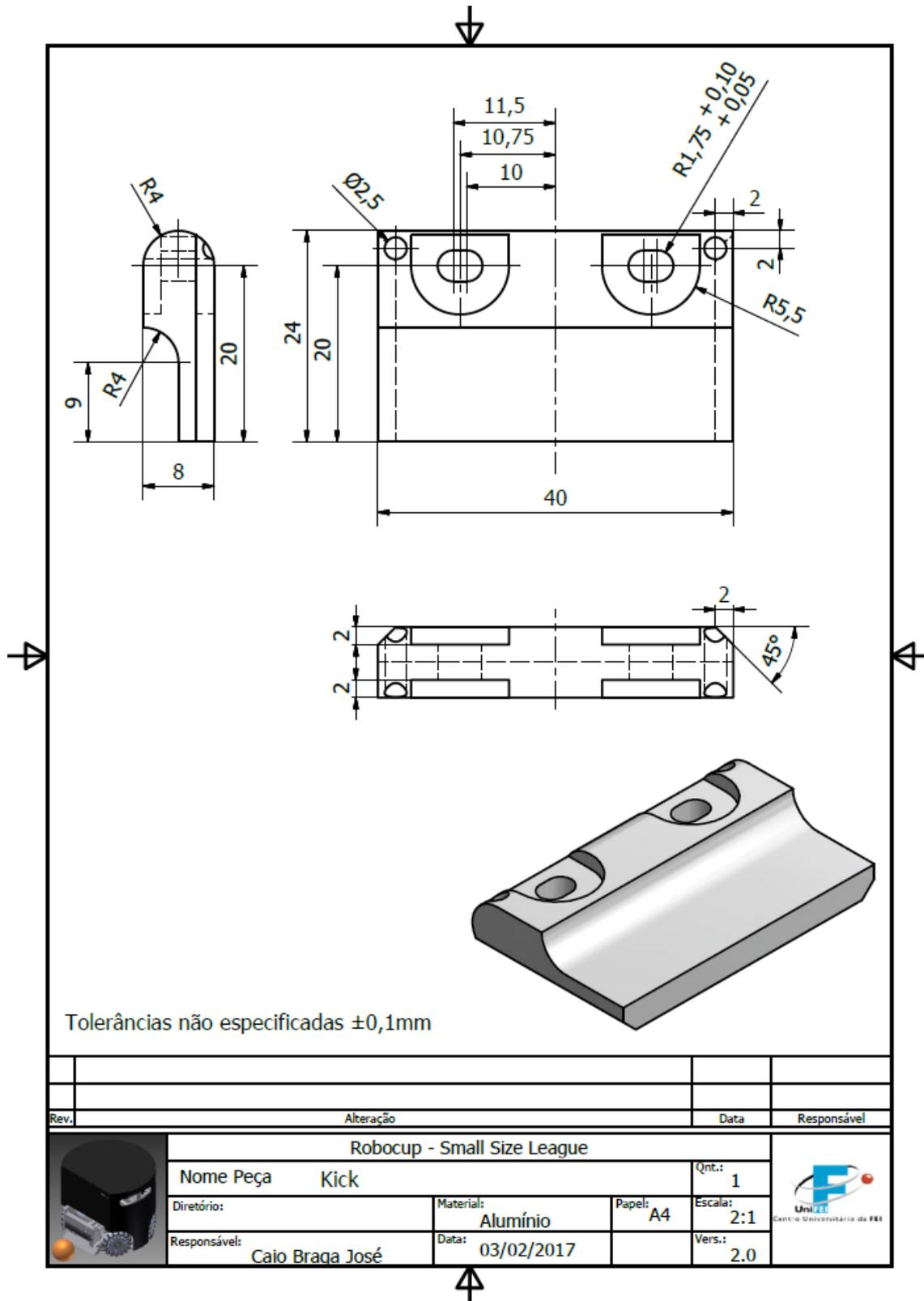
Fonte: Autor

Figura 53: Desenho - Pino da articulação



Fonte: Autor

Figura 54: Desenho - Kick



Fonte: Autor