

**INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
MINAS GERAIS**

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Mecanismo de Alinhamento

Ana Helena do Rosário M. Gonçalves

Biatriz Veloso da Silveira

Maria Luiza de Souza

Mariana Ribeiro Lopes

Arcos/MG

2017

**ANA HELENA DO ROSÁRIO M. GONÇALVES, BIATRIZ VELOSO DA SILVEIRA,
MARIA LUIZA DE SOUZA E MARIANA R. LOPES**

Mecanismo de Alinhamento

Trabalho apresentado à disciplina TAI do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) campus Arcos sobre uma modelagem3D para aprendizagem em aplicações das matérias estudadas neste período.

Professor: Francisco de Sousa Júnior

Arcos/MG

2017

RESUMO

A meta do projeto é demonstrar ao leitor como foi feito e quais são os princípios da máquina que através de um mecanismo de alinhamento organiza rolamentos. A idealização do mesmo se baseou em máquinas industriais que melhoram a produtividade, diminui o esforço físico e contribui com maior rapidez na produção. Este relatório apresenta o desenvolvimento do projeto.

Palavras-chave: Mecanismo de alinhamento, rolamentos, máquinas industriais.

Lista de Figuras

Figura 1: Mandriladora.....	10
Figura 2: Máquina a vapor.....	11
Figura 3: Vista superior das partes da bandeja.....	14
Figura 4: Vista superior das dimensões dos círculos da bandeja.....	15
Figura 5: Bandeja (Inventor).....	15
Figura 6: Vista superior das especificações da área de alinhamento.....	16
Figura 7: Parte do percurso (Inventor).....	17
Figura 8: Vista superior do dimensionamento do caminho de saída.....	18
Figura 9: Rolamento.....	19
Figura 10: Rolamento (Inventor).....	19
Figura 11: Mesa de suporte (Inventor).....	20
Figura 12: Esferas de aço.....	21
Figura 13: Ilustração simbólica da mesa com esferas.....	21
Figura 14: Pistão (Inventor).....	23
Figura 15: Pistão Pneumático.....	23
Figura 16: Diagrama “Ensaio de Tração do Aço”	25
Figura 17: Ensaio de tração Aço Carbono vs Aço Inox.....	26
Figura 18: Taxa de corrosão do aço.....	27
Figura 19: Especificações graxa SKF LESA 2.....	28
Figura 20: Tipos de desgastes.....	30
Figura 21: Centro de massa.....	32
Figura 22: Área do interstício entre 7 rolamentos.....	33
Figura 23: Esfera de aço (Inventor).....	34
Figura 24: Momento de Inércia.....	37
Figura 25: Coeficientes de atrito.....	39
Figura 26: Diagrama de forças.....	44
Figura 27: Mecanismo de alinhamento (Inventor).....	45

Lista de Quadros

Quadro 1: Detalhamento.....	13
Quadro 2: Massa do rolamento.....	31
Quadro 3: Resultado μ estático máximo em relação a cada raio.....	40

Listas de Gráficos

Gráfico 1: Velocidade angular.....	36
Gráfico 2: Comportamento raio vs μ estático	39
Gráfico 3: Estudo μ estático em relação ao raio da bandeja	40
Gráfico 4: Resultado velocidade.....	43

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO	8
1.1	Objetivo geral.....	8
1.2	Justificativa	8
1.3	Relevância do trabalho	9
1.4	Metodologia	9
2.0	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
3.0	EXECUÇÃO DO PROJETO	13
3.1	Bandeja.....	13
3.2	Rolamentos.....	18
3.3	Mesa de Suporte	20
3.4	Motor de acionamento do mecanismo de alinhamento	22
3.5	Pistão pneumático	22
4.0	METODOLOGIA	Erro! Indicador não definido.
4.1	Rolamentos.....	30
4.1.1	Tratamento das medições da massa do rolamento	31
4.2	Bandeja.....	31
4.3	Sistema de sustentação e locomoção da mesa.....	34
4.4	Cálculos sobre o movimento de rotação da máquina	35
4.5	Momento de Inércia	36
4.6	Cálculo μ estático máximo.....	37
4.7	Força mínima que o pistão pode exercer sobre os rolamentos	43
4.8	Cálculos no programa MATLAB.....	44
5.0	RESULTADOS OBTIDOS	45
6.0	CONCLUSÃO	46
7.0	ANEXOS	47
8.0	REFÊRENCIAS	84

1.0 INTRODUÇÃO

Mecanismo de alinhamento surgiu com a necessidade dos operários de colocar produtos em ordem sem fazer grande esforço e com uma maior rapidez. Mecanismo é a combinação de peças para obter determinado resultado, neste caso, o movimento da bandeja. Alinhamento é o processo de alinhar produtos.

Este trabalho apresenta ilustrações de um mecanismo de alinhamento. O projeto possui dois únicos objetivos específicos: alinhar rolamentos e a animação do programa Inventor Software Cad 3D da Autodesk.

O trabalho foi realizado por um grupo de quatro estudantes do segundo período do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), Campus Arcos. Os alunos utilizaram os conceitos vistos em sala de aula e os já adquiridos no período anterior juntamente com os professores para demonstrar na prática a utilização dos conceitos teóricos abordados no curso.

1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo, demonstrar o funcionamento de um mecanismo de alinhamento, apresentar os cálculos/dimensionamentos usados para sua montagem.

1.2 Justificativa

O desenvolvimento deste projeto, além de integrar os conceitos estudados no atual período de Engenharia Mecânica, tem-se como justificativa o fato do mecanismo de alinhamento se movimentar alinhando objetos pesados de um ponto para o outro, diminuindo o esforço humano consideravelmente, devido o processo de alinhar ser automático. Tal mecanismo justifica-se por conferir rapidez no processo dentro de uma indústria e uma maior produtividade.

1.3 Relevância do trabalho

O mecanismo de alinhamento é utilizado em indústrias em geral, como alimentícia, automotivas e nas mais diversas atividades que exigem o processo de alinhar produtos de maneira automática.

1.4 Metodologia

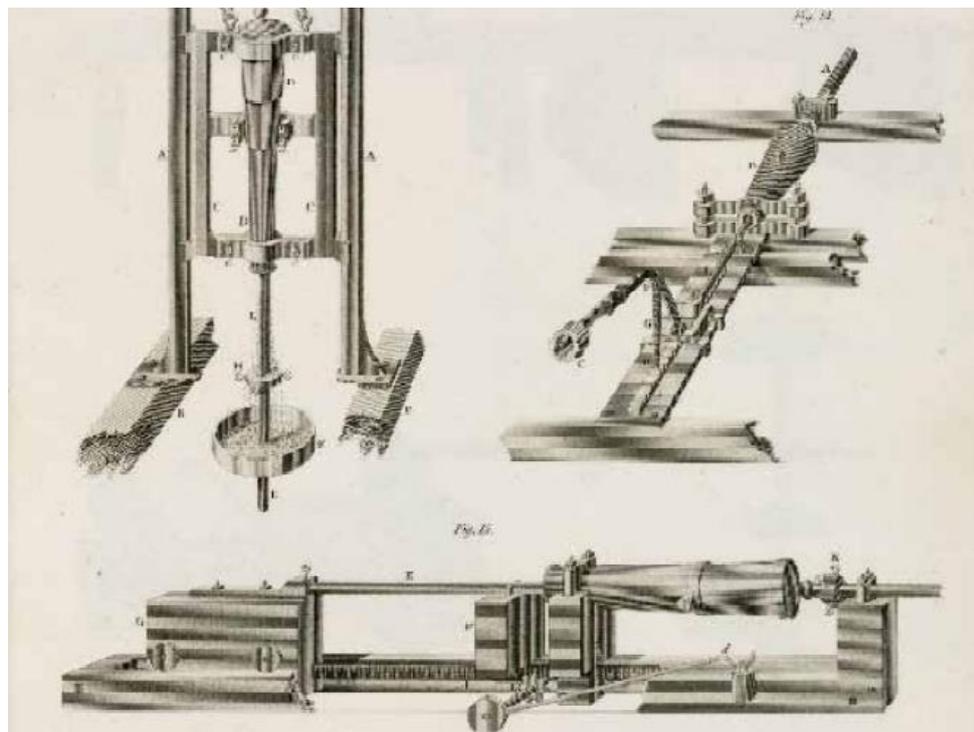
Para a execução do trabalho, a metodologia considerou uma extensa revisão bibliográfica que culminou na elaboração de uma memória de cálculo para a execução do projeto. Foram usados métodos de tentativa e erro, fórmulas para fazer os cálculos, e o programa Inventor Software Cad 3D da Autodesk para a animação do projeto.

2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A história das máquinas é mais antiga do que parece, mecanizar processos manuais sempre foi um desejo de grande parte das sociedades ao longo dos séculos, por isso hoje essas máquinas são indispensáveis dentro da sociedade.

Sua origem remota as primeiras civilizações. Povos da Mesopotâmia já utilizavam processos e materiais rudimentares como madeira, para fabricação de objetos e móveis. O primeiro mecanismo foi uma máquina-ferramenta no século XVI: uma mandriladora de canhões de bronze movida à água.

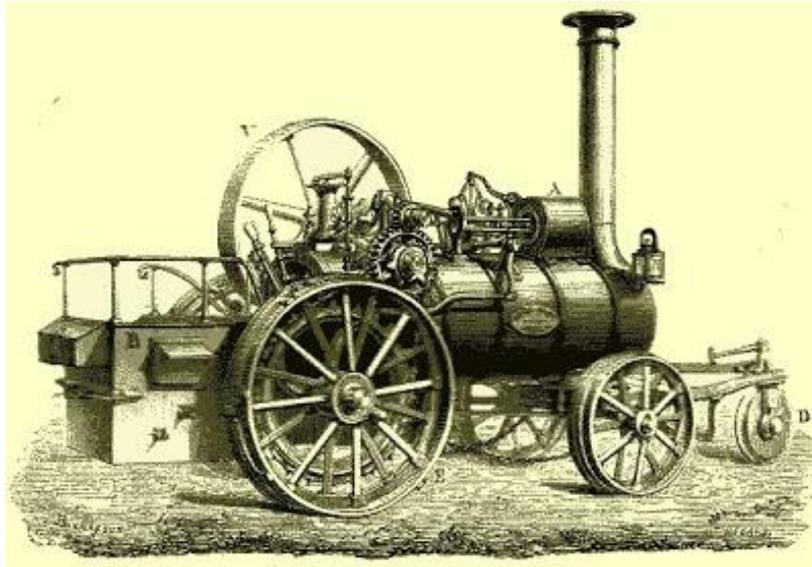
Figura1: Mandriladora



Fonte: A HISTÓRIA DAS MÁQUINAS (Acessado em:07.mai.2017)

Com a intenção de revolucionar a indústria e reduzir o esforço humano, no decorrer do século de XVIII, na Inglaterra criou-se a máquina a vapor que se propagou rapidamente pelo país, elemento que foi chave para a Revolução Industrial. A máquina a vapor foi se expandindo para países, como França, Alemanha, Itália, entre outros.

Figura 2: Máquina a vapor



Fonte: O impacto da máquina a vapor na Revolução Industrial. (Acessado em: 07 mai. 2017).

Ao passar dos anos com as grandes evoluções tecnológicas, as indústrias foram aperfeiçoando as máquinas, adaptando-as a serviços repetitivos e pesados, tornando o trabalho fácil, prático e aumentando a produtividade.

A busca por aperfeiçoamento foi longa e entre 1850 e 1950 foram descobertas as fontes de energia, tais como: petróleo, água, urânio, entre outros, o que revolucionou ainda mais a produção industrial. Na busca por maiores lucros, houve a necessidade de ampliar a produção, surgindo assim as linhas de montagem e esteiras rolantes. Todas essas mudanças desencadearam a chamada Segunda Revolução Industrial e o surgimento de grandes indústrias.

Já em meados do século XX, após o término da Segunda Guerra Mundial, surgiu a Terceira Revolução Industrial, liderada pelos Estados Unidos da América que se tornou a grande potência econômica deste período, ficou conhecido como Revolução Técnico-Científica-Informacional, tal período em que a indústria eletrônica efetivamente se moderniza, além dos avanços da pecuária e da agricultura. Essa Revolução também foi encarregada pela integração entre a tecnologia, produção e ciência.

Assim, assiste-se uma nova tendência que está sendo implantada no setor secundário da economia: a automação da produção industrial. Os maquinários modernos realizam determinadas atividades que antes eram os trabalhadores que realizavam, como por exemplo,

uma máquina de alinhamento. Esta máquina é utilizada para alinhar diversos produtos e com sua utilização facilitar o processo de produção.

3.0 EXECUÇÃO DO PROJETO

Neste tópico será relatado e ilustrado todo o andamento do projeto. Com o detalhamento das medidas e materiais utilizados (Quadro 1).

Quadro 1: Detalhamento

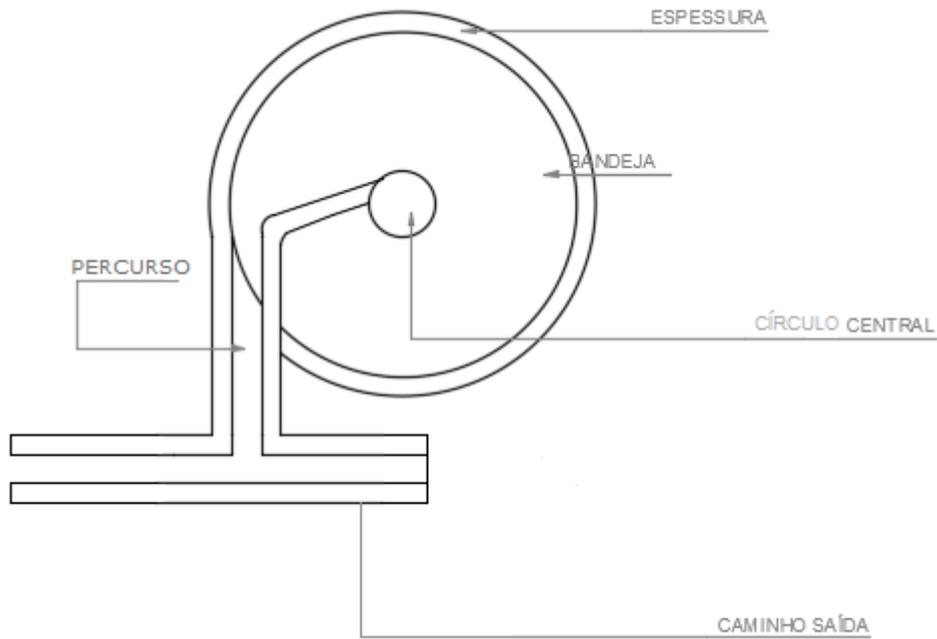
DENOMINAÇÃO	QUANTIDADE	ESPECIFICAÇÃO
Esferas de aço	22	Esferas de aço inox (especificações da escolha do material na página 24), diâmetro de 80 mm.
Graxa SKF LESA 2	-	Imagem e especificações na página 27.
Bandeja aço	1	Bandeja aço inox, 1000 mm de diâmetro e 50 mm de espessura.
Mesa para suporte	1	Mesa para suporte de 1000 mm de diâmetro, com corredor de 80 mm de largura, 90 mm de profundidade, e pés de 1000 mm de altura.
Pistão pneumático	1	Cilindro pneumático com válvula reguladora de velocidade.

Fonte: Próprios Autores

3.1 Bandeja

A bandeja é a parte em que os rolamentos são depositados onde ocorre o processo de alinhamento dos mesmos. Nesta etapa a bandeja em questão gira e, com a ajuda de um mecanismo de alinhamento, alinha os rolamentos de uma forma contínua. Assim eles passam por um percurso até um corredor de saída onde um pistão pneumático empurra um a um para outro processo (Figura 3).

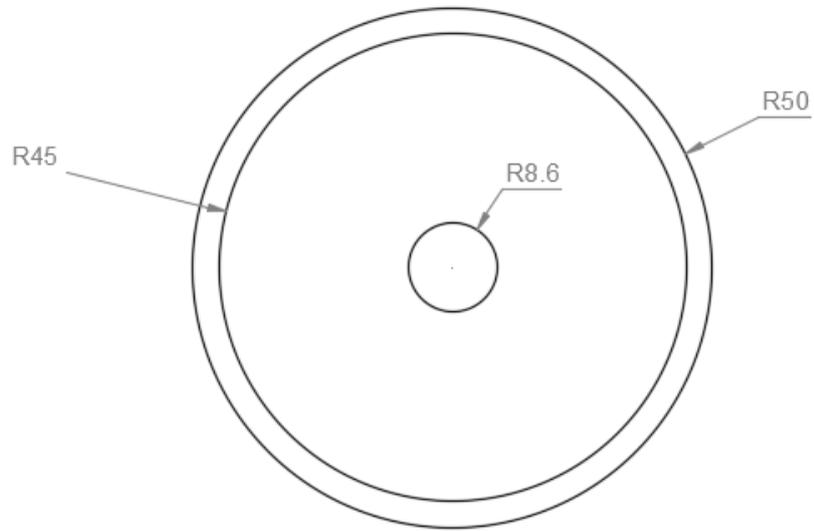
Figura 3: Vista superior das partes da bandeja



Fonte: Próprios Autores.

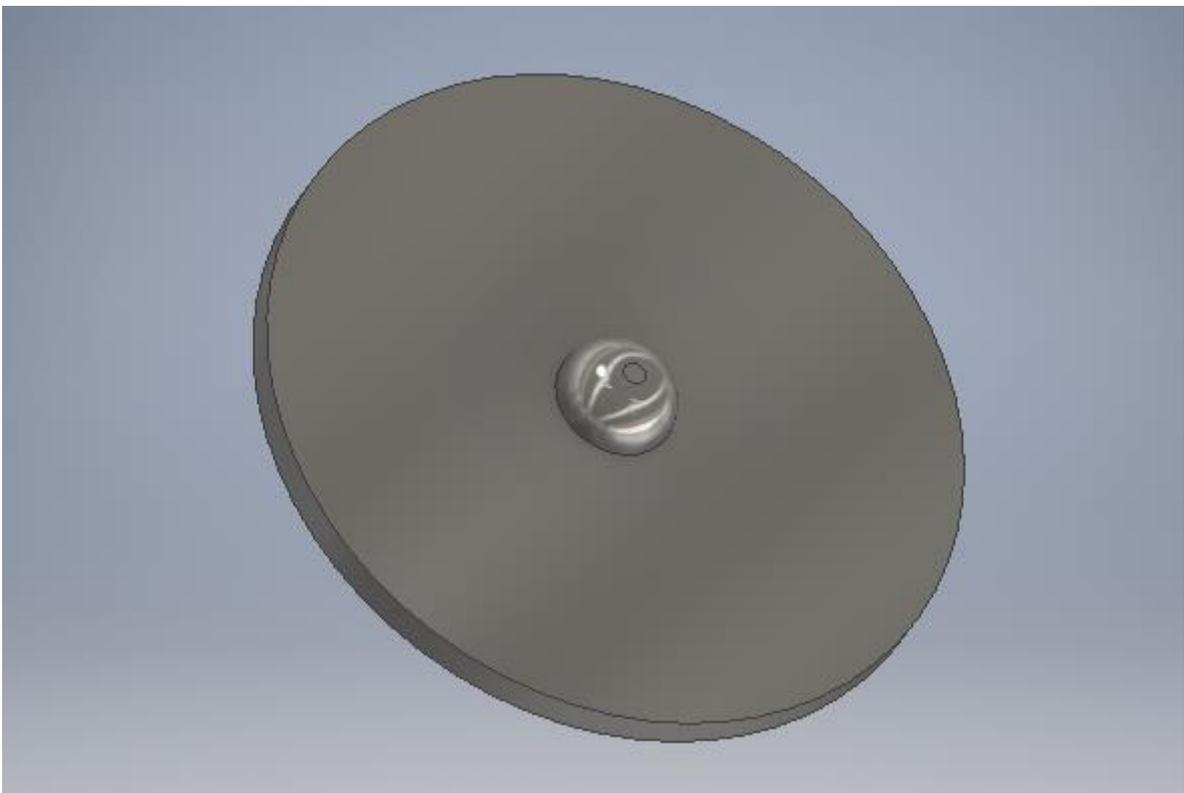
A superfície da bandeja tem como raio externo 500 mm e 50 mm de altura. A mesma também possui uma espessura de 50 mm, assim, restando 450 mm livres para os rolamentos. No centro observa-se um círculo central com raio de 86 mm que funciona como um impedimento para que os rolamentos não parem dentro dessa área (Figura 4). O desenho feito no *Software Inventor* se encontra na Figura 5.

Figura 4: Vista superior das dimensões dos círculos da bandeja



Fonte: Próprios Autores.

Figura 5: Bandeja (Inventor)

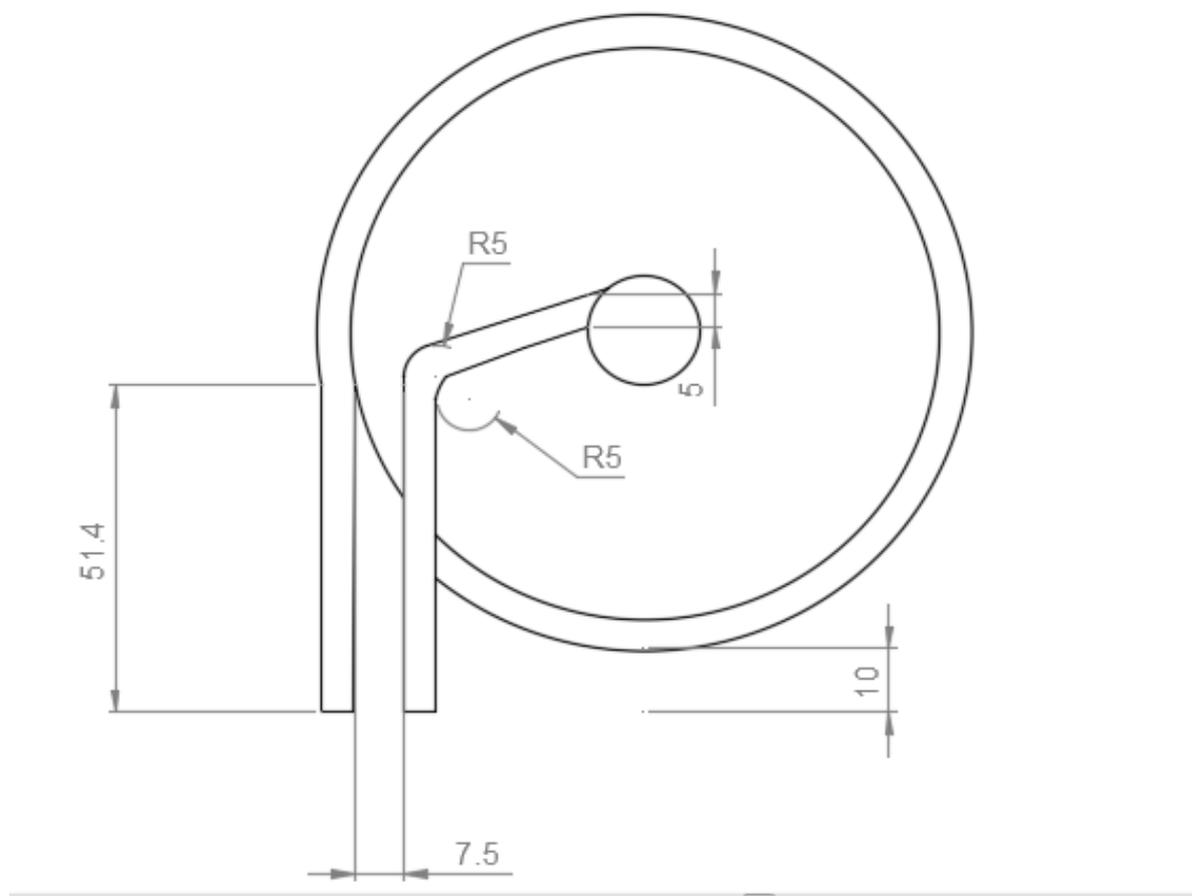


Fonte: Próprios autores

O sistema de alinhamento funciona com a bandeja que, ao girar com os rolamentos, os encaminha um a um para um percurso de saída.

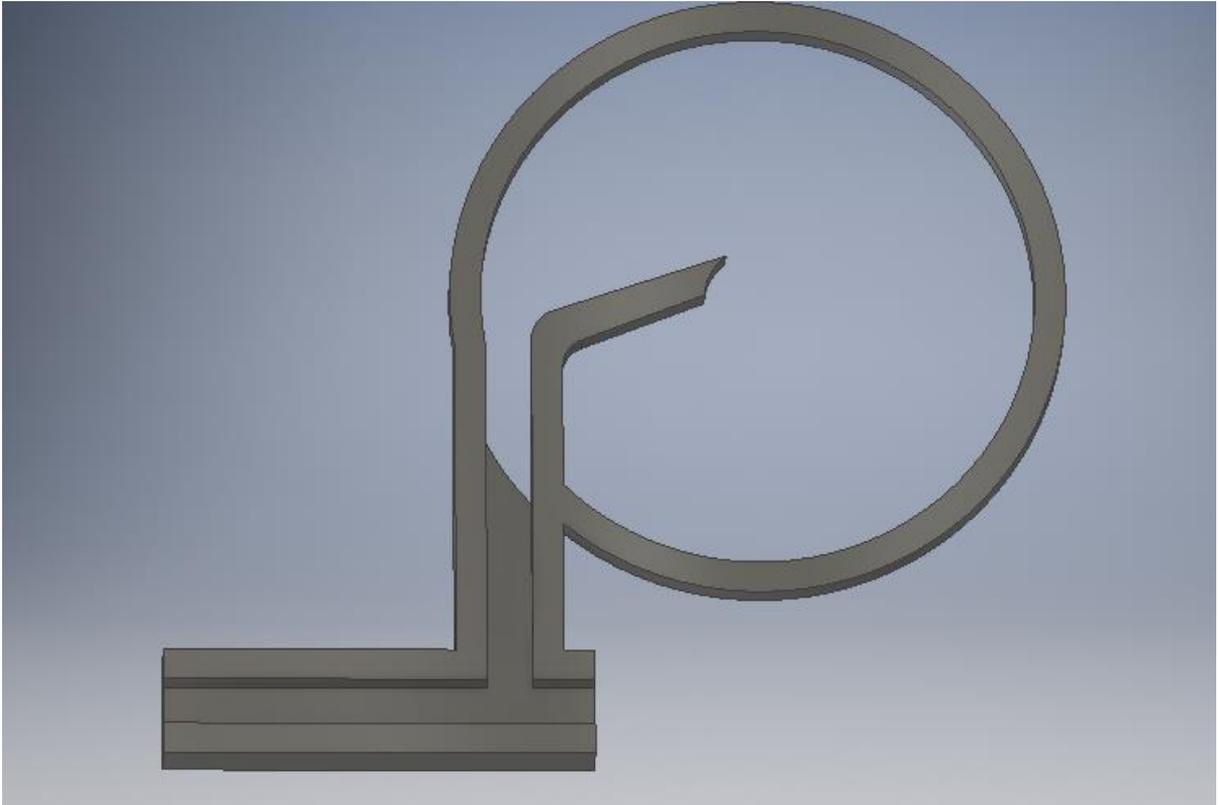
Foi definido que o sistema de alinhamento deve ter um percurso de saída com 75 mm de largura, medida adotada levando em consideração o diâmetro externo dos rolamentos, 72 mm. Esse percurso se inicia após 100 mm do fim da bandeja, e 514 mm desse ponto, gera-se uma reta que coincide com a extremidade inferior do círculo central. Para melhor elaboração, na espessura inferior do caminho após os 514 mm, foi utilizado o comando *Fillet* do *Software Auto CAD Mechanical 2017* de 50 mm, para fazer a ligação da espessura até o círculo central (Figura 6). A inclinação da espessura deveu-se à facilidade dos rolamentos escorregarem até entrarem no percurso. Seu desenho no *Software Inventor* se encontra na Figura 7.

Figura 6: Vista superior das especificações da área de alinhamento



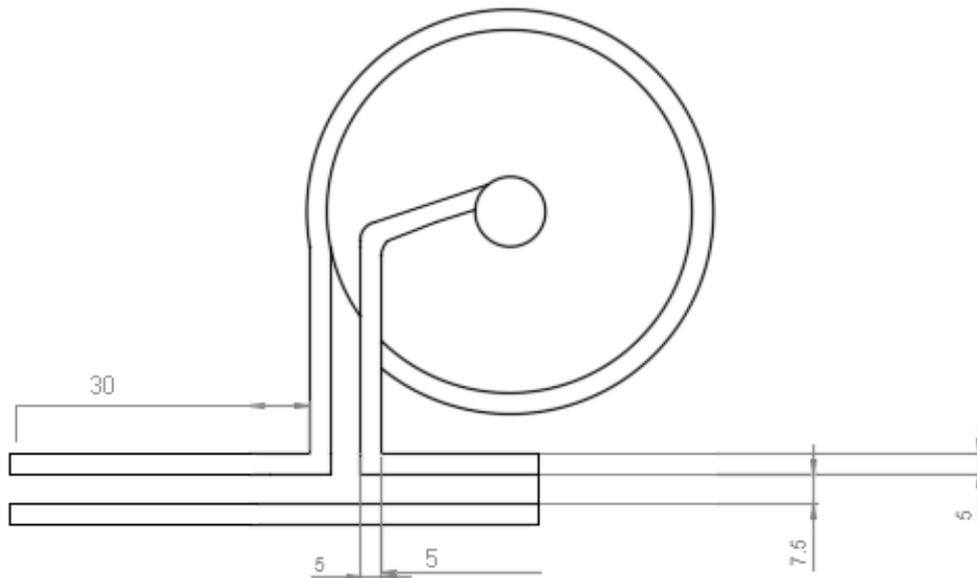
Fonte: Próprios autores

Figura 7: Parte do percurso (Inventor)



O corredor de atuação do pistão pneumático possui 50 mm de espessura nas suas barreiras laterais e 75 mm de largura, com o intuito dos rolamentos não ficarem muito espaçados, para que o pistão pneumático os empurre um a um por até 100 mm, onde começariam um novo ciclo (Figura 8).

Figura 8: Vista superior do dimensionamento do caminho de saída



Fonte: Próprios Autores.

Os cálculos das dimensões do projeto em si se encontram em ANEXOS.

3.2 Rolamentos

Para demonstração do sistema de alinhamento decidiu-se que seriam utilizados rolamentos de aço (Figura 9). Um rolamento foi pesado e medido fisicamente com as ferramentas encontradas no laboratório de física do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) *Campus Arcos*. Foram realizadas cinco pesagens de sua massa com a balança de resolução 0,001 g (Quadro 2), e com esse mesmo rolamento foram feitas medições de suas grandezas com o paquímetro de resolução do instrumento 0,02 mm. Foi obtida como massa, a média 346,696 g, e obteve-se a medida de raio externo 7200 mm e raio interno 3400 mm. Seu desenho no *Software Inventor* segue na Figura 10.

Figura 9: Rolamento



Fonte: ROLAMENTO RÍGIDO DE ESFERAS 6202 2Z – SKF.(Acessado em: 29.mai.2017)

Figura 10: Rolamento (Inventor)

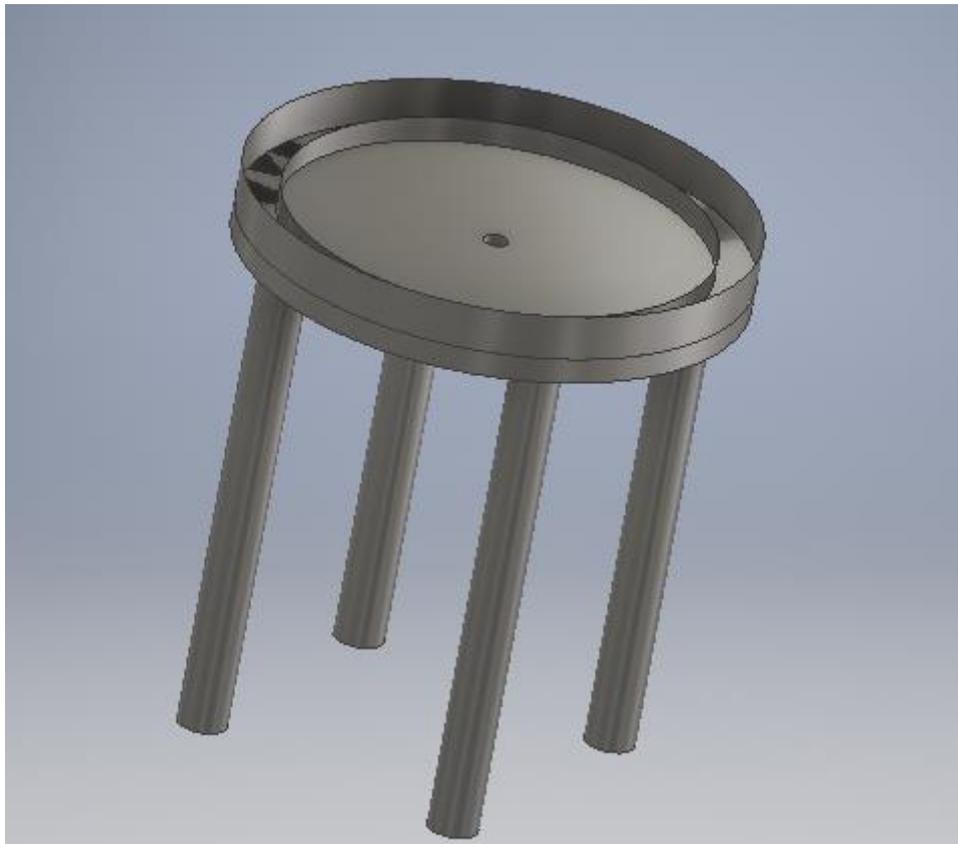


Fonte: Próprios autores

3.3 Mesa de Suporte

Para suportar o peso da bandeja com os rolamentos foi necessário utilizar um suporte. Para atender essa necessidade foi elaborada uma mesa, com um corredor (Figura 11) onde se encontram esferas de aço inox lubrificadas (Figura 12) e, sobre essas esferas se encaixa a bandeja.

Figura 11: Mesa de suporte (Inventor)



Fonte: Próprios autores

Figura 12: Esferas de aço



Fonte: ESFERAÇO. (Acessado em: 07.jul.2017).

Figura 13: Ilustração simbólica da mesa com esferas



Fonte: Rolamento oscilante de esferas-1205-TVH-C3-medias INA-FAG-SCHAEFFLER. (Acessado em: 10.jun.2017).

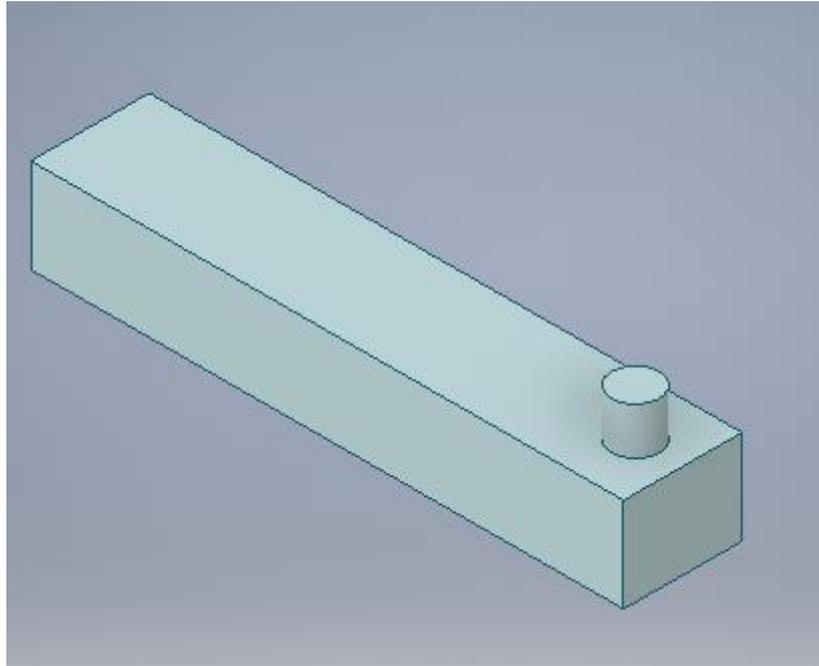
3.4 Motor de acionamento do mecanismo de alinhamento

Após conversar e ter orientações de alguns professores foi decidido entre o grupo não incluir um motor ao estudo do projeto, devido a um longo empenho que seria necessário para aprofundar-se neste tópico e à falta de conhecimento dos integrantes nesse assunto. Junto com esse motor, haveria a necessidade de uma caixa de redução que também é uma parte bem complexa do trabalho, e que poderia até resultar em um Trabalho Acadêmico Integrador (TAI) próprio.

3.5 Pistão pneumático

Cilindros pneumáticos, conhecidos como cilindros de ar, são dispositivos usados para exercer uma força através da pressurização do ar. Ele é formado basicamente por um pistão móvel, uma câmara cilíndrica e canais de entrada e saída de ar. Quando o ar comprimido é bombeado para o fundo do cilindro inferior de um pistão móvel (Figura 15), o ar se expande empurrando para cima através do cilindro oco, o pistão móvel e gerando força. A haste se desloca da base do pistão para cima, através do topo do cilindro (Figura 15). Através desse mecanismo pneumático os rolamentos são deslocados para uma nova etapa do processo de fabricação. Neste trabalho o pistão (Figura 14) possui um compressor que impulsiona cada rolamento, um a um, através do movimento do pistão. O pistão definido foi Cilindro Mini Iso 6432 Pneumático Diam.25mm X 125mm de curso.

Figura 14: Pistão (Inventor)



Fonte: Próprios autores

Figura 15: Pistão pneumático



Fonte: TCO. (Acessado em: 11.jul.2017).

4.0 METODOLOGIA

Para melhor formulação do projeto, a máquina de alinhamento é simulada aplicação real em uma fábrica. Segue algumas condições de uso da mesma.

O projeto da máquina de alinhamento funciona em uma indústria de rolamentos. A máquina se localiza em um ambiente com temperatura entre 19° e 23°C, que é o ideal para que não haja desgaste por temperaturas elevadas e, pensando no bem estar dos funcionários um ambiente de trabalho adequado, são necessários equipamentos de controle de temperatura ambiente. A mesa possui uma altura de 1000 mm, pensada para melhor atender as normas de ergonomia e assim facilitar as atividades dos operários que trabalham sem realizar esforços desnecessários e sem prejudicar a saúde, visando o melhor desempenho e rapidez na produção.

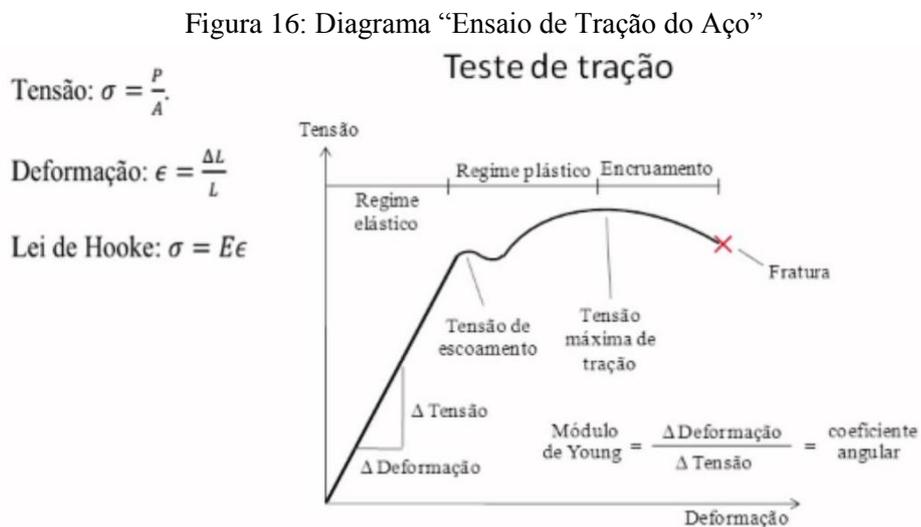
Para que a máquina funcione de maneira satisfatória, é preciso seguir alguns passos na montagem. Uma máquina de rotação deve ser colocada em uma fundação adequada e plana, se esta condição não se satisfizer a operação da máquina pode causar danos como: mau funcionamento, quebra de peças e consecutivamente parando a produção. Os componentes rotativos devem ser bem alinhados e balanceados para que não ocorram vibrações excessivas que podem vir causar um alto desgaste. E também ter boa lubrificação nos componentes rolantes, tais como as esferas do projeto, para que diminua o atrito e desgastes das superfícies. Esses aspectos têm que ser seguido rigorosamente para que futuramente não haja necessidade de manutenção corretiva, que é quando o equipamento quebra ou deixa de funcionar, prejudicando assim todo o processo. É essencial que esse tipo de manutenção na máquina não ocorra ou ocorra raramente.

A empresa funciona em três turnos sendo eles, de 6:00 às 14:00 horas, das 14:00 às 22:00 horas e das 22:00 às 6:00 horas, assim a produção é ininterrupta. Considerando isso, são indispensáveis os cuidados com as máquinas que sofrem um alto desgaste em pouco tempo.

Essa máquina é composta por uma bandeja onde os rolamentos são depositados, e por meio de um mecanismo, são alinhados. Foi necessário um suporte para essa bandeja manter o equilíbrio. Esse suporte é composto por esferas de aço em uma guia que funciona como um tipo de rolamento, possibilitando uma melhor rolagem da bandeja. Sempre que duas superfícies se movimentam, uma em função da outra, ocorre um desgaste fazendo com que haja perda progressiva das superfícies dos materiais. Isso ocasiona um sério problema na

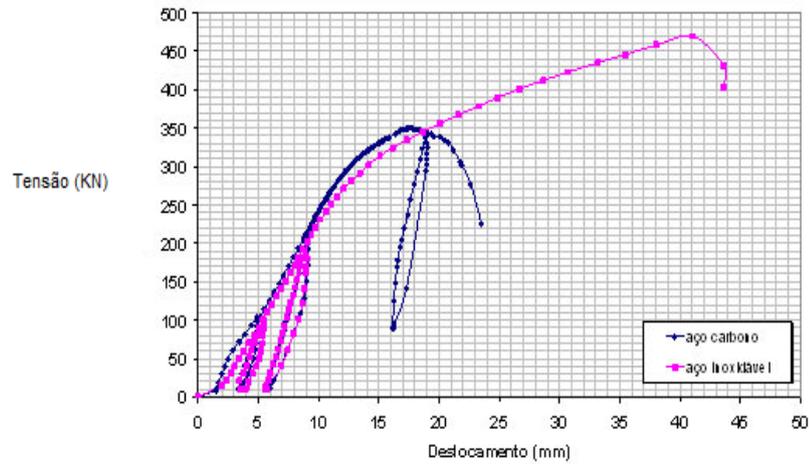
máquina se as esferas começarem a perder material devido a esse desgaste a um aumento de folga entre elas e entre o corredor fazendo com que elas comecem a se movimentar de uma forma indesejável e imprecisa. Uma maneira de reduzir esse desgaste é a lubrificação dessa superfície de contato.

A escolha do aço inox como principal material do projeto se deu por dois principais motivos, sendo esses motivos mais significativos do que o custo do material, já que o aço inox é mais caro. O primeiro deles foi devido a sua alta capacidade de sofrer tensão com uma menor deformação, superior ao aço carbono por exemplo. Segue imagem de ensaio de tração (Figura 16).



Fonte: Vídeo Aula - Concurso Petrobras Engenharia - Resistência dos Materiais - Tesla Concursos. (Acessado em: 11.jul.2017).

Figura 17: Ensaio de tração aço Aço Carbono vs Aço Inox.



Fonte: AcelorMittal. Acessado em: (11.jul.2017).

O segundo motivo foi a sua alta resistência à corrosão, sendo um fator muito importante, já que a máquina funciona de uma forma ininterrupta e não poderia parar frequentemente para trocas de peças. A Figura 18 a mostra a taxa de corrosão em uma atmosfera industrial em relação ao tempo de diferentes tipos de aço.

Figura 18: Taxa de corrosão do aço

Papel do cromo nos aços: taxa de corrosão x percentual de cromo do aço

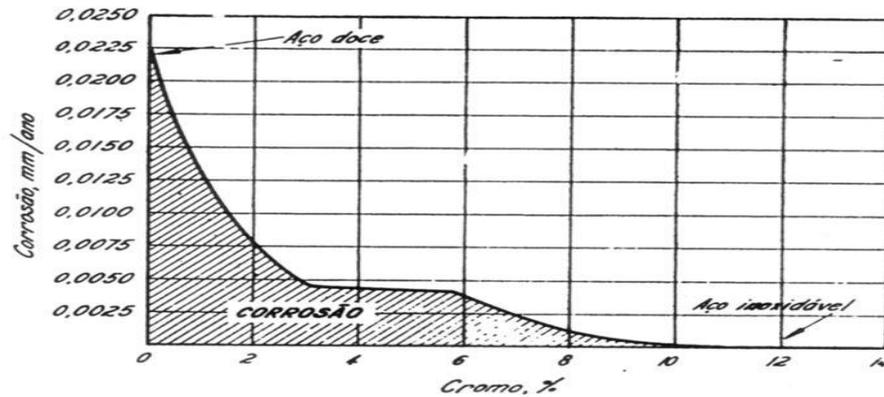


Fig. 142 — Gráfico ilustrando a passividade dos aços-cromo expostos durante 10 anos a uma atmosfera industrial.

Fonte: Manual do Computador. (Acessado em: 01.jun.2017).

Depois de muita pesquisa sobre tipos de lubrificação, já que existem inúmeros tipos, tais como, lubrificantes oleosos, líquidos e fluidos lubro-refrigerantes (emulsões), lubrificantes graxos, lubrificantes pastosos e lubrificantes secos, foi escolhido para a lubrificação das esferas de aço a graxa SKF LESA 2 que combina um óleo-base de polialfaolefina (PAO) sintética com um espessante exclusivo de sabão de lítio. Essa graxa foi escolhida por possuir baixo coeficiente de atrito, ajudar a reduzir a perda de energia devido ao atrito provocado durante o movimento de rotação, giro silencioso, excelente estabilidade de oxidação. Segue imagem (Figura 19) com as especificações da graxa.

Figura 19: Especificações graxa SKF LESA 2

Dados técnicos			
Designação	LESA 2/(tamanho do pacote)		
Código DIN 51825	KP2G-50	Proteção contra corrosão	
Classe de consistência NLGI	2	Emcor: – padrão ISO 11007	0–1
Tipo de sabão	Lítio	Resistência à água	
Cor	Bege	DIN 51 807/1, 3h a 90 °C	1 máx.
Tipo de óleo base	PAO (polialfaolefinas)	Separação de óleo	
Faixa de temperatura	–50 a +110 °C (–60 a +230 °F)	DIN 51 817, 7 dias a 40 °C, estático, %	<4
Ponto de gota DIN ISO 2176	>180 °C (355 °F)	Corrosão de cobre	
Viscosidade do óleo base		DIN 51 811, 110 °C	1 máx. 100 °C (210 °F)
40 °C, mm ² /s	18	Vida útil da graxa do rolamento	
100 °C, mm ² /s	4,5	Teste ROF	
Penetração DIN ISO 2137		Vida L ₅₀ a 20 000 rpm, h	>1 000 a 110 °C (230 °F)
60 cursos, 10 ⁻¹ mm	265–295	Desempenho EP	
100 000 cursos, 10 ⁻¹ mm	+50 máx. (325 máx.)	Teste de 4 esferas, carga de solda DIN 51350/4	2 000 min.
Estabilidade mecânica		Tamanhos de pacotes disponíveis	
Estabilidade de rolagem, 50h a 80 °C, 10 ⁻¹ mm	380 máx.		Cartucho de 420 ml Lata de 1, 5 kg

Fonte: Graxa de baixo atrito. (Acessado em: 03.jun.2017).

Por fim, uma lubrificação bem feita apresenta vantagens, conforme citadas pelo TELECURSO 2000 (1997 p.240), reduz a manutenção em até 35% e com trocas de graxa corretas o consumo de lubrificantes cai em até 50%.

Para melhor desempenho da máquina alguns aspectos da manutenção preventiva têm que ser adotados, tais como, evitar o excesso de graxa na lubrificação que pode provocar um aumento da temperatura, cuidados com a limpeza no local de funcionamento da máquina para evitar que possíveis partículas de poeira, entre outras, entrem em contato com a graxa, caso isso ocorra ela passará a ter atrito devido a essas partículas, cuidados com a temperatura da máquina, calibração dos componentes, manuseio correto, entre outros. Esses processos podem evitar a maior parte dos defeitos do equipamento, diminuindo ao máximo a possibilidade de quebra. A manutenção preventiva é a manutenção de menor custo e a melhor a ser seguida para a máquina.

Para uma manutenção preditiva os componentes da máquina são trocados ou verificados antes que apresente qualquer defeito. É feita com base em estudos que determinam o MTBF, termo inglês que é uma abreviação de "Maximum Time Between Failures", ou seja, "Tempo Máximo entre falhas". Esse tempo máximo entre falhas é dado pelo fabricante da peça que edifica a máquina. Para saber o MTBF de uma determinada peça,

o fabricante determina um procedimento de teste que verifica quanto tempo a peça fica em uso até parar de funcionar por algum defeito, quanto maior o índice do MTBF maior a confiabilidade sobre determinada peça, e como consequência, a manutenção será avaliada em questão de eficiência da mesma. Porém esse teste não pode ser totalmente confiável, pois cada fabricante tem uma metodologia, e outros fatores devem ser levados em consideração para que as peças sejam trocadas. Sendo assim, essa manutenção deve ser seguida com cuidado, levando em conta fatores externos (JÚNIOR, 2010).

A análise da graxa colocada nas esferas como meio de lubrificação para monitoramento é muito valioso, a vida útil da máquina está de certa forma ligada a boa conservação desse lubrificante, água e poeira são componentes comuns de contaminação. O controle da qualidade dessa graxa pode vir a ser uma manutenção proativa, quando um estudo da mesma pode prever falhas catastróficas. Neste estudo uma amostra da graxa é verificada em laboratório, onde é possível detectar partículas de diversas formas e tamanhos do material de contato, como no caso do projeto, partículas de aço. Essas partículas trazem com si mesmas informações preciosas já que seu tamanho, por exemplo, pode dizer a intensidade do atrito que está havendo e o quanto de material essas superfícies já perderam. Esse estudo também pode dizer sobre qual tipo de desgaste a máquina está sofrendo, sendo os principais tipos de desgastes: desgaste abrasivo, desgaste adesivo, desgaste por fadiga e desgaste corrosivo.

O desgaste abrasivo ocorre normalmente quando partículas de sujeira entram em contato com o lubrificante. O desgaste adesivo está ligado à má lubrificação ou produto lubrificante com baixa viscosidade ou escolha incorreta, muito peso, temperaturas elevadas, velocidade baixa. Já o desgaste de fadiga está associado a problemas de escala mecânica, montagem incorreta, ajustes inadequados, desbalanceamento e desalinhamento. Por sua vez, partículas de desgaste corrosivo é o resultado de fluidos corrosivos, como água ou substâncias de processo em contato com superfícies metálicas (CARVALHO, 2017).

Algumas informações sobre desgaste de superfícies de aço (Figura 20).

Figura 20: Tipos de desgastes

DESGASTE LEVE	DESGASTE SEVERO
Resulta em superfícies extremamente suaves, geralmente mais suaves do que a original.	Resulta em superfícies ásperas, com ranhuras profundas, em geral muito mais rugosa do que a original.
Produz partículas extremamente pequenas, na ordem de 0,1 mm de diâmetro	Produz partículas grandes, tipicamente com diâmetro médio acima de 0,01 mm.
Alta resistência elétrica de contato, pouco contato metálico real.	Baixa resistência elétrica de contato, formação de contatos metálicos.

Fonte: Tribologia e Lubrificação – aula 4 – estudo do desgaste-b. (Acessado em: 30.mai.2017).

Por fim, muitos aspectos foram mostrados além do projeto em si. Para a execução do mesmo, muitos fatores precisam ser observados desde a escolha dos materiais a possíveis problemas que podem vir a acontecer. Dos planejamentos para a execução até a manutenção, vários detalhes devem ser estudados e levados em consideração, só assim é possível obter um projeto mais confiável.

4.1 Rolamentos

Material: aço

Diâmetro externo: 7,20 cm

Diâmetro interno: 3,40 cm

Massa média pesada na balança: 346,696 g

Retirando de um Livro Didático de Matemática a fórmula da área de um círculo, ao calcular a área que cada rolamento ocupa na bandeja, ou seja, sua área externa encontrou-se o valor de $40,71 \text{ cm}^2$, sendo $A = \text{área}$; $r = \text{raio}$

$$A = \pi \times r^2$$

$$A = \pi \times 3,6^2$$

$$A = 40,71 \text{ cm}^2$$

Para obter sua área real, é preciso desconsiderar sua área interna, sendo ela $A = \pi \times 1,7^2$: $9,08 \text{ cm}^2$ da área externa, obtendo uma área de $31,63 \text{ cm}^2$, calculada como:

$$\begin{aligned} \text{Área externa} - \text{Área interna} &= \\ 40,71 - 9,08 &= \\ 31,63 \text{ cm}^2 & \end{aligned}$$

Calculando sua força normal em repouso em relação à bandeja, foi utilizada a fórmula $F_N = m \times g$ extraída do livro Fundamentos de Física (HALLIDAY, DAVID, 10ª edição, v. 1, 105 p.), resultando em uma força de $F_N = 0,346696 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2$, ou seja, $3,3976 \text{ N}$.

4.1.1 Tratamento das medições da massa do rolamento

Quadro 2: Massa do rolamento

MEDIDAS MASSA ROLAMENTO					
Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Média das 5
346,693	346,695	346,694	346,699	346,694	346,696

Fonte: Próprios Autores.

Usando os 7 passos encontrados no livro Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial, tem-se o Resultado de Medição, $RM = 346,964 \pm 0,278 \text{ mm}$ (ANEXO 1).

4.2 Bandeja

Material: aço inox

Diâmetro: 100 cm

Espessura: 5 cm

Retirando de um Livro Didático de Matemática a fórmula da área de um círculo, $A = \pi \times r^2$ obtêm-se a área da superfície total da bandeja, $7853,98 \text{ cm}^2$, sendo ela calculada como: $A = \pi \times 50^2$

Descontando 5 cm de espessura da barreira da bandeja, tem-se uma área de $6361,72 \text{ cm}^2$, calculada a partir de $A = \pi \times 45^2$.

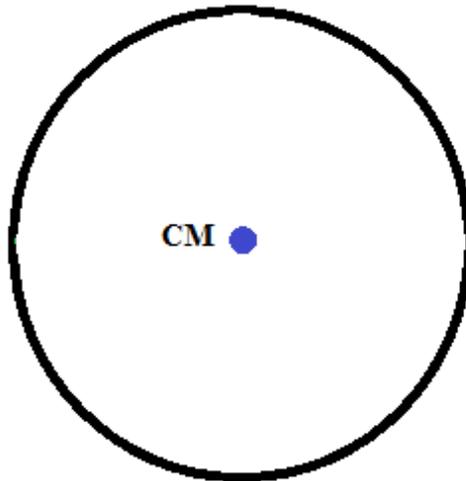
Calculando o seu volume obtêm-se um valor de $39269,90 \text{ cm}^3$ (ANEXO 2).

Sabendo que o material da bandeja é aço inox com densidade $7,85 \text{ g/cm}^3$ *, e considerando o volume encontrado, foi possível calcular a sua massa, que resultou em $308,26 \text{ kg/cm}^3$ (ANEXO 3).

O percurso dos rolamentos tem uma área de $383,5 \text{ cm}^2$ (ANEXO 4).

O centro de massa da bandeja é justamente no seu centro círculo central (Figura 21), devido aos eixos de simetria seno e cosseno serem retas que vão de um extremo a outro, transpassando pelo seu centro. Assim, sabe-se que nesse centro de massa, a velocidade da bandeja é zero, ou seja, não deve haver rolamento nessa parte, pois ele não sairá do lugar.

Figura 21: Centro de massa



Fonte: Próprios autores

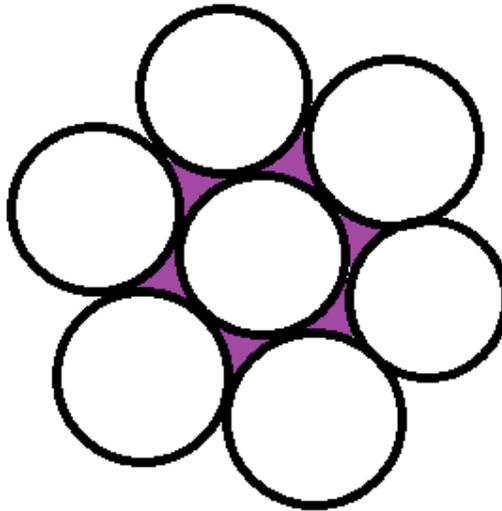
Sabendo que o raio desse círculo é $8,6 \text{ cm}$, encontramos uma área de $232,35 \text{ cm}^2$ (ANEXO 5).

*(Fonte: <https://pt.slideshare.net/OscarEustchio1/tabela-de-densidade-dos-materiais> (Acessado em: 15.mai.2017))

Para encontrar a área livre da bandeja foi descontado da área total, $6361,72 \text{ cm}^2$ a área do círculo central, $232,65 \text{ cm}^2$, que se resultou em uma área de $6129,37 \text{ cm}^2$ (ANEXO 6).

Calculando a quantidade de rolamentos possíveis na bandeja, somando a área de cada um com a área de interstício entre 7 rolamentos (Figura 22), se obteve um valor de 68 rolamentos (ANEXO 7).

Figura 22: Área do interstício entre 7 rolamentos



Fonte: Próprios autores

Descontando 10% deste resultado para que os rolamentos não fiquem agrupados uns aos outros, tem-se um valor de 61,443 rolamentos (ANEXO 8). Entretanto, sabendo que o máximo de rolamentos é uma variável qualitativa discreta, ou seja, apresentam apenas números inteiros, pode-se concluir que a quantidade máxima de rolamentos na bandeja é 61.

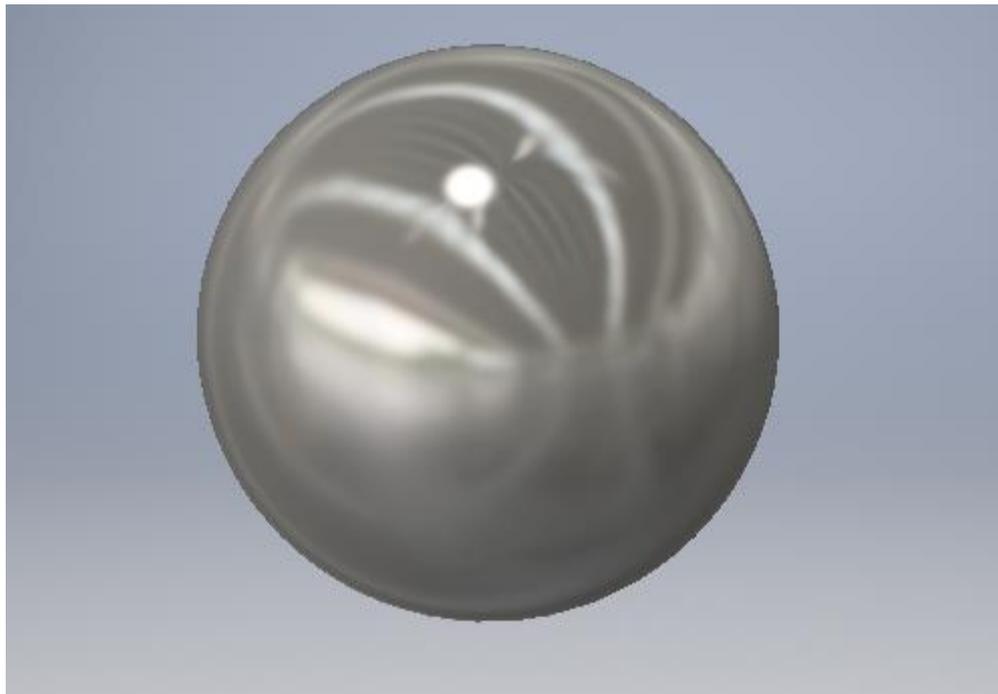
Após isso, foi possível calcular a massa total dos rolamentos, $21,15 \text{ kg}$ (ANEXO 9).

4.3 Sistema de sustentação e locomoção da mesa

Para o sistema de sustentação e locomoção da mesa, sabe-se que o coeficiente de atrito cinético da esfera lubrificada é 0,05 (Figura 25 - Força de Atrito).

As esferas de aço possuem um diâmetro de 8 cm (Figura 23).

Figura 23: Esfera de aço (Inventor)



Fonte: Próprios autores

Dado este valor, foi retirado de um Livro Didático de Matemática a fórmula da área de uma esfera, encontrando um valor de $201,06 \text{ cm}^2$ (ANEXO 10). Sendo assim, o seu volume $268,08 \text{ cm}^3$ (ANEXO 11).

Considerando que o interior desse corredor é livre e sua espessura é de 8 cm, ou seja, o tamanho do diâmetro da esfera, achou-se uma área inferior de $5541,77 \text{ cm}^2$ (ANEXO 12).

Sendo assim, a área desse corredor, $2312,21 \text{ cm}^2$ (ANEXO 13).

Sabendo que a área da esfera é $201,06 \text{ cm}^2$, e considerando que ela ocupa apenas a metade dessa área no corredor, então sua área passará a ser $100,53 \text{ cm}^2$. Ocupando assim, 23 esferas no corredor (ANEXO 14). Porém, devido ao atrito entre elas, aderiu-se uma pequena distância de segurança, adotando 22 esferas.

Para ter uma facilidade sobre os cálculos em relação ao movimento de rotação da bandeja sobre o raio, foi desenvolvida uma matriz onde rapidamente poderá ser dado o resultado de várias fórmulas de física (ANEXO 15).

4.4 Cálculos sobre o movimento de rotação da máquina

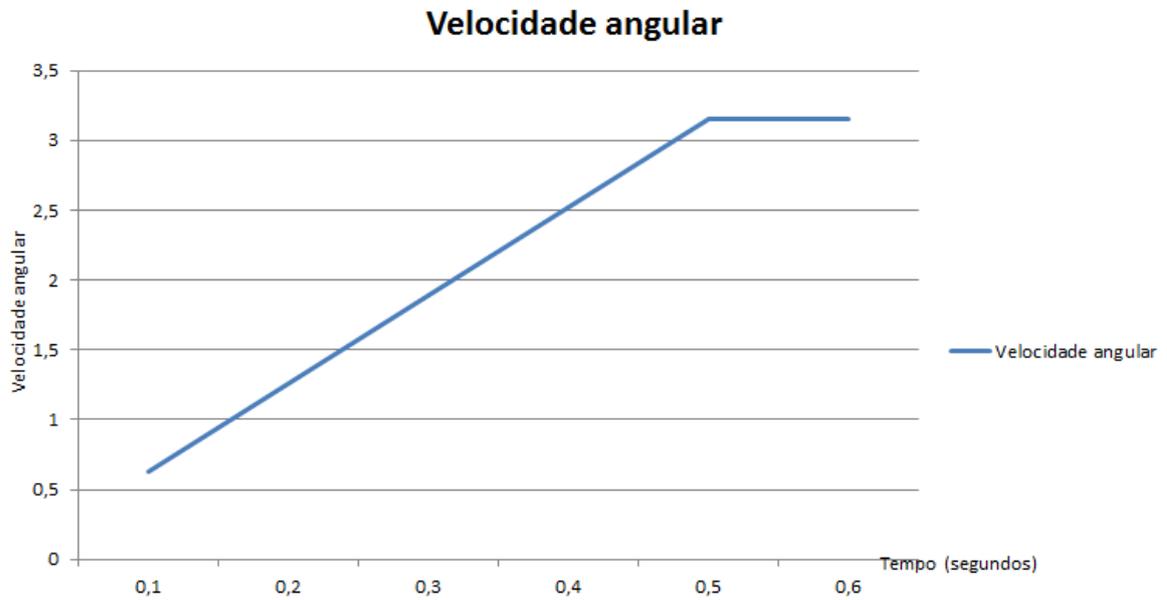
Devido à complexidade de um sistema de redução e transmissão que deveria ser acoplado à máquina e ao motor, não foi definido um motor para colocar o projeto em movimento. Para fins didáticos, considerado um motor com frequência (F) de 30 rpm, que equivale ao número de vezes de rotação do motor a um período (T) de um minuto.

Sendo a unidade escolhida de frequência RPM - Rotação Por Minuto, alguns fatores foram observados. A máquina não pode trabalhar lentamente, pois prejudicaria a produção, e nem rapidamente, podendo jogar os rolamentos para fora da bandeja. Levando esses critérios em consideração foi definido que a máquina teria um giro de 30 rpm. Portanto, compreendendo que a velocidade angular é a razão da mudança de posição angular por um intervalo de tempo, utilizando sua fórmula retirada do livro Fundamentos de Física, se encontra um resultado de $\omega = 3,15 \text{ rad/s}$ (ANEXO 16).

Assim, a aceleração angular é a taxa de variação da velocidade angular. Para obter esse resultado, definiu-se que a máquina gastaria 5 s para atingir 30 rpm, encontrando um valor de $\alpha = 0,63 \text{ rad/s}^2$ (ANEXO 17).

Considerando que antes da máquina manter sua velocidade constante a partir de 5 s, ela cresce em função do tempo, no entanto foi calculada a velocidade nos tempos 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4s (ANEXO 18) como mostra o Gráfico 1.

Gráfico 1: Velocidade angular

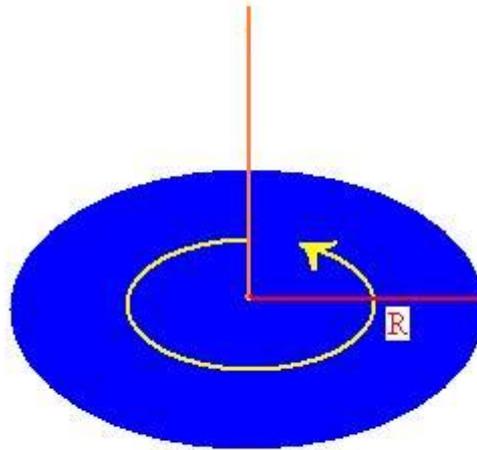


Fonte: Próprios autores

4.5 Momento de Inércia

O Momento de Inércia (Figura 24) é uma grandeza que quantifica a dificuldade de se colocar um corpo rígido em rotação, segundo a sua massa e a distribuição dessa massa em relação ao eixo de rotação. A fórmula utilizada para calcular o momento de Inércia, é apenas uma simplificação, considerando apenas a bandeja parada com a capacidade máxima de rolamentos em relação ao seu eixo central.

Figura 24: Momento de Inércia de um círculo



Fonte: Momento de Inércia.(Acessado em: 04.mai.2017).

Usando a fórmula do PDF Física 1*, resultou-se num valor de Momento de Inércia $41,18 \text{ kg/m}^2$ (ANEXO 19).

Sabendo que o Torque é o efeito de rotação provocado por uma ou mais forças aplicadas sobre um corpo em relação ao eixo de rotação, foi calculado o torque mínimo que o motor deveria exercer para girar a máquina. Sua equação foi retirada do livro Fundamentos de Física (HALLIDAY, DAVID, 10ª edição, v. 1, 278 p.), obtendo um valor de $\tau = 41,18 \times 0,63 \text{ rad / s}^2$ (ANEXO 20).

4.6 Cálculo μ estático máximo

Coefficiente de atrito é uma grandeza que não possui unidade de medida (adimensional) que mostra se as superfícies tem uma alta ou baixa resistência ao movimento relativo entre elas.

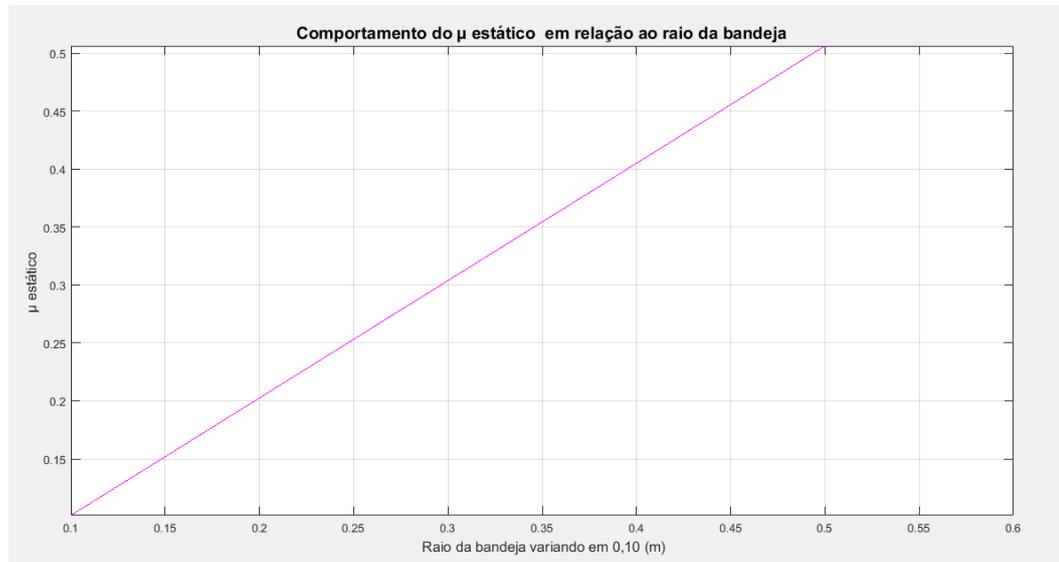
*(Fonte: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/131949/mod_resource/content/1/9-Rotacao_inercia.pdf. Acessado em: 20.jun.2017).

Sobre o coeficiente de atrito estático SILVA (2016, p.1) diz:

Um objeto em repouso sobre uma superfície só iniciará um movimento se uma força for aplicada sobre ele. Essa força possui um valor mínimo necessário que deve ser maior que o atrito existente entre o objeto e a superfície. Quando a força aplicada superar a força de atrito, o movimento será iniciado. Essa força de atrito existente quando o objeto está parado é denominada de atrito estático.

No momento em que o objeto está parado, o número que representa a maior ou menor dificuldade imposta pela superfície ao movimento é denominado de coeficiente de atrito estático. Para representá-lo, normalmente se utiliza o símbolo μ_E

Sendo assim, o μ estático máximo é a força de contato do rolamento com a mesa em iminência de movimento relativo, que é igual a força mínima necessária para iniciar o movimento do rolamento. O cálculo do μ estático da bandeja é feito em relação a pontos diferentes do raio da bandeja, sendo o μ estático máximo no maior raio da bandeja que é 0,50 m. Para melhor análise de como em cada ponto será a reação do rolamento, se ele começa a se movimentar ou fica estático, levando em conta que o ponto central da bandeja seja o ponto zero o início de um raio, os pontos são divididos em: $r_1 = 0,1m; r_2 = 0,2m; r_3 = 0,3m; r_4 = 0,4m; r_5 = 0,5m$. Sabendo que a força de atrito é a resultante centrípeta, $F_{at} = F_{centrípeta}$, logo, $\mu_{estático\ máximo} = \frac{r}{g} \times \omega^2$ (ANEXO 21). Para determinado cálculo foi utilizado ferramentas matriciais (ANEXO 22). Segue um gráfico (Gráfico 2) sobre o resultado da operação de matriz.

Gráfico 2: Comportamento raio vs μ estático

Fonte: Próprios autores

Com a imagem é possível observar que conforme o raio vai ficando mais distante do centro maior fica o μ estático.

Sobre o μ estático analisou-se que, em comparação ao μ estático do aço do rolamento sobre o aço da bandeja sem nenhuma lubrificação, os rolamentos não irão se mover pelo fato que o μ estático neste caso é sempre maior. A seguir, a Figura 25 sobre o μ estático do aço.

Figura 25: Coeficientes de atrito

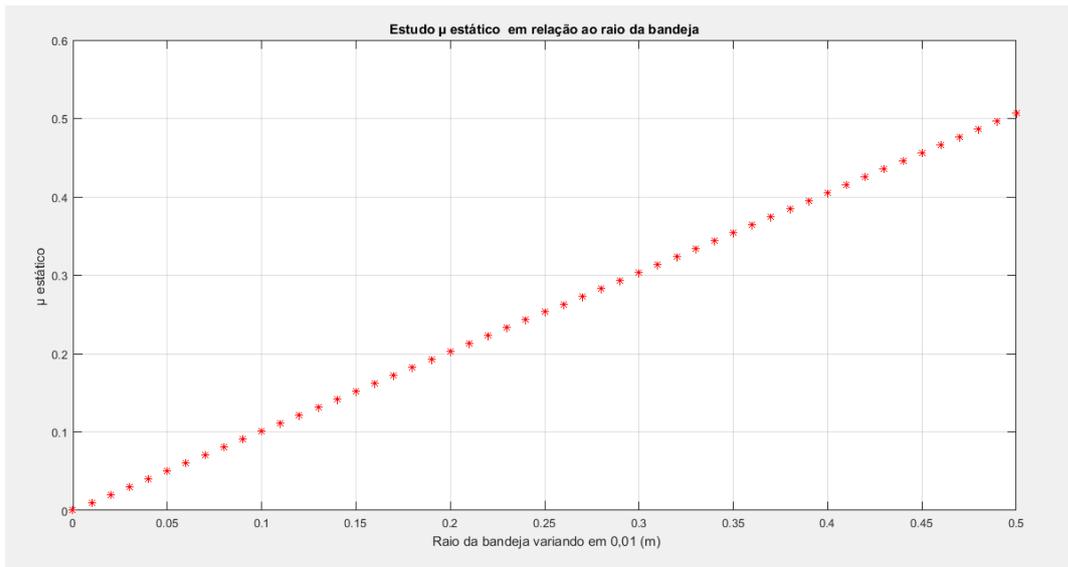
Material	Coefficiente de atrito estático	Coefficiente de atrito cinético
Borracha sobre concreto	1,00	0,80
Aço sobre aço (a seco)	0,80	0,60
Aço sobre aço (com lubrificação)	0,10	0,05
Madeira sobre madeira	0,50	0,20
Madeira sobre neve	0,12	0,06

Fonte: Força de Atrito. (Acessado em: 27.mai.2017)

A seguir, o Gráfico 3 com os coeficientes de atrito em 50 pontos da bandeja. Observa-se que à medida que o raio aumenta, o seu coeficiente de atrito cresce. Com análise do gráfico

ressalta que o coeficiente de atrito estático máximo para manter o rolamento estático é igual á 0.5062. Outro ponto a ser destacado é que apesar do ponto do raio 0 está sendo apresentado no gráfico ele não existe, pois não existe um raio 0. Segue o Gráfico 3:

Gráfico 3: Estudo μ estático em relação ao raio da bandeja



Fonte: próprios autores.

Para melhor compreensão dos valores, foi implementado um quadro (Quadro 3) com os valores do Gráfico 3.

Quadro 3: Resultado μ estático máximo em relação a cada raio

RAIO	μ ESTÁTICO MÁXIMO	RAIO	μ ESTÁTICO MÁXIMO
R0 0	0		
R1 0.0100	0.0101	R26 0.2600	0.2632
R2 0.0200	0.0202	R27 0.2700	0.2734
R3 0.0300	0.0304	R28 0.2800	0.2835
R4 0.0400	0.0405	R29 0.2900	0.2936
R5 0.0500	0.0506	R30 0.3000	0.3037

R6 0.0600	0.0607	R31 0.3100	0.3139
R7 0.0700	0.0709	R32 0.3200	0.3240
R8 0.0800	0.0810	R33 0.3300	0.3341
R9 0.0900	0.0911	R34 0.3400	0.3442
R10 0.1000	0.1012	R35 0.3500	0.3544
R11 0.1100	0.1114	R36 0.3600	0.3645
R12 0.1200	0.1215	R37 0.3700	0.3746
R13 0.1300	0.1316	R38 0.3800	0.3847
R14 0.1400	0.1417	R39 0.3900	0.3949
R15 0.1500	0.1519	R40 0.4000	0.4050
R16 0.1600	0.1620	R41 0.4100	0.4151
R17 0.1700	0.1721	R42 0.4200	0.4252
R18 0.1800	0.1822	R43 0.4300	0.4353
R19 0.1900	0.1924	R44 0.4400	0.4455
R20 0.2000	0.2025	R45 0.4500	0.4556
R21 0.2100	0.2126	R46 0.4600	0.4658
R22 0.2200	0.2227	R47 0.4700	0.4759
R23 0.2300	0.2329	R48 0.4800	0.4860
R24 0.2400	0.2430	R49 0.4900	0.4961
R25 0.2500	0.2531	R50 0.5000	0.5062

Fonte: próprios autores.

O espaço nulo da matriz, ou seja, onde o μ estático máximo, matriz resposta, é sempre igual à zero (ANEXO 23).

Com matriz de coeficiente é fácil observar que a única forma de obter a matriz resposta nula é multiplicando a matriz de coeficientes pela a matriz de incógnitas igual a 0. Ou seja, o único momento em que o μ estático máximo é 0 é quando ele parte do raio igual a 0, isso é, no centro da bandeja em um ponto 0 o μ estático máximo se anula.

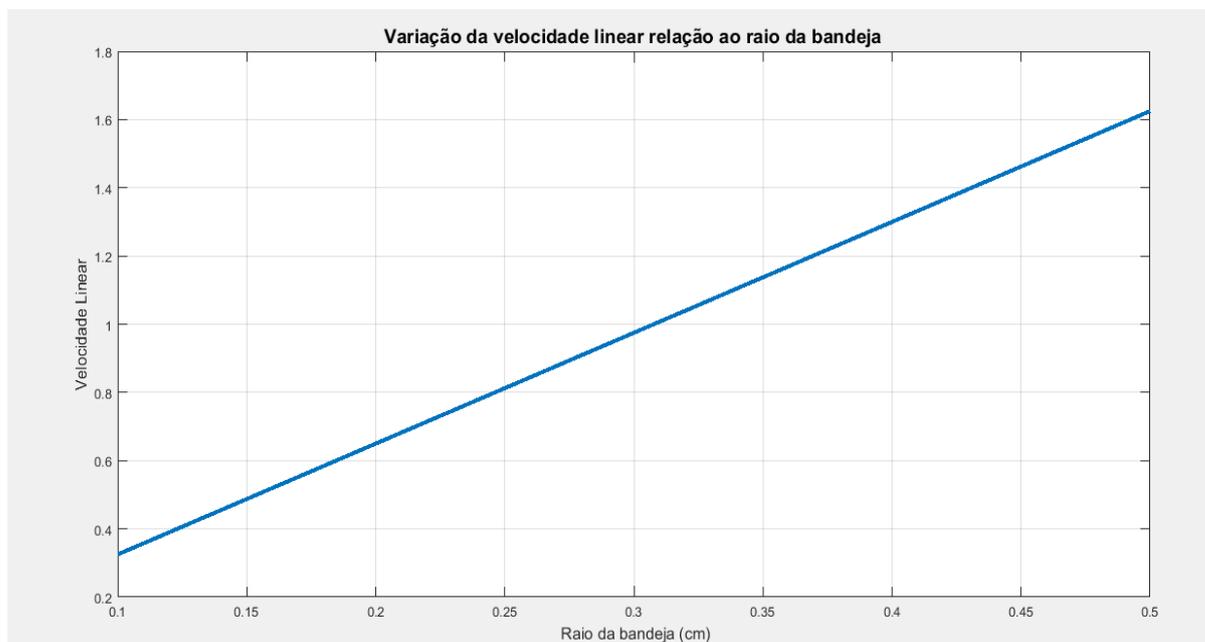
Sobre transformação linear de matriz, a esse respeito, (HEFEZ; FERNADEZ, 2016, p.124) declara:

As funções nas quais se está interessado na Álgebra Linear são as funções cujos domínios e contradomínios são espaços vetoriais e que, além disso, preservam as operações de adição de vetores e de multiplicação de um vetor por um escalar. Isto é o conteúdo da definição a seguir. Sejam V e W espaços vetoriais. Uma transformação linear de V em W é uma função $T : V \rightarrow W$ que possui as seguintes propriedades: (i) $T(v_1 + v_2) = T(v_1) + T(v_2)$, para quaisquer v_1 e v_2 em V ; (ii) $T(av) = aT(v)$, para quaisquer v em V e a em R . As propriedades (i) e (ii) são equivalentes à seguinte propriedade: $T(v_1 + av_2) = T(v_1) + aT(v_2)$, (1) para quaisquer v_1 e v_2 em V e para qualquer a em R . É esta caracterização das transformações lineares que utilizaremos, por ser mais prática, para mostrar que determinada função entre espaços vetoriais é uma transformação linear.

Para determinar se a matriz de coeficientes é uma transformação linear foi feito determinados cálculos (ANEXO 24). Podendo afirmar que as condições $T(u + v) = T(u) + T(v)$ e $T(\alpha u) = \alpha T(u)$ são verdadeiras, provando que a aplicação é linear.

A velocidade linear dada pela fórmula $V = \omega \times r$, dos rolamentos em relação ao raio da bandeja, se encontra n variações, pois os rolamentos podem estar localizados em vários pontos distintos da bandeja. Para fins didáticos dividiu-se a bandeja em 5 pontos diferentes de raio, como nos cálculos anteriores, $r_1 = 0,1m$; $r_2 = 0,2m$; $r_3 = 0,3cm$; $r_4 = 0,4m$; $r_5 = 0,5m$. Para encontrar a velocidade linear desses pontos, também foram usadas ferramentas matriciais (ANEXO 25). Assim, obtêm-se uma representação gráfica dos resultados (Gráfico 4).

Gráfico 4: Resultados velocidade



Fonte: Próprios autores.

O gráfico mostra que, de acordo que o raio se distância do centro maior será sua velocidade.

No espaço nulo da matriz dos coeficientes a velocidade é zero. Dado a matriz de coeficiente é fácil observar que a única forma de obter a matriz resposta nula é multiplicando a matriz de coeficientes pela a matriz de incógnitas igual a 0. Ou seja, o único momento em que velocidade é 0 é quando ele parte do raio igual a 0 (ANEXO 26).

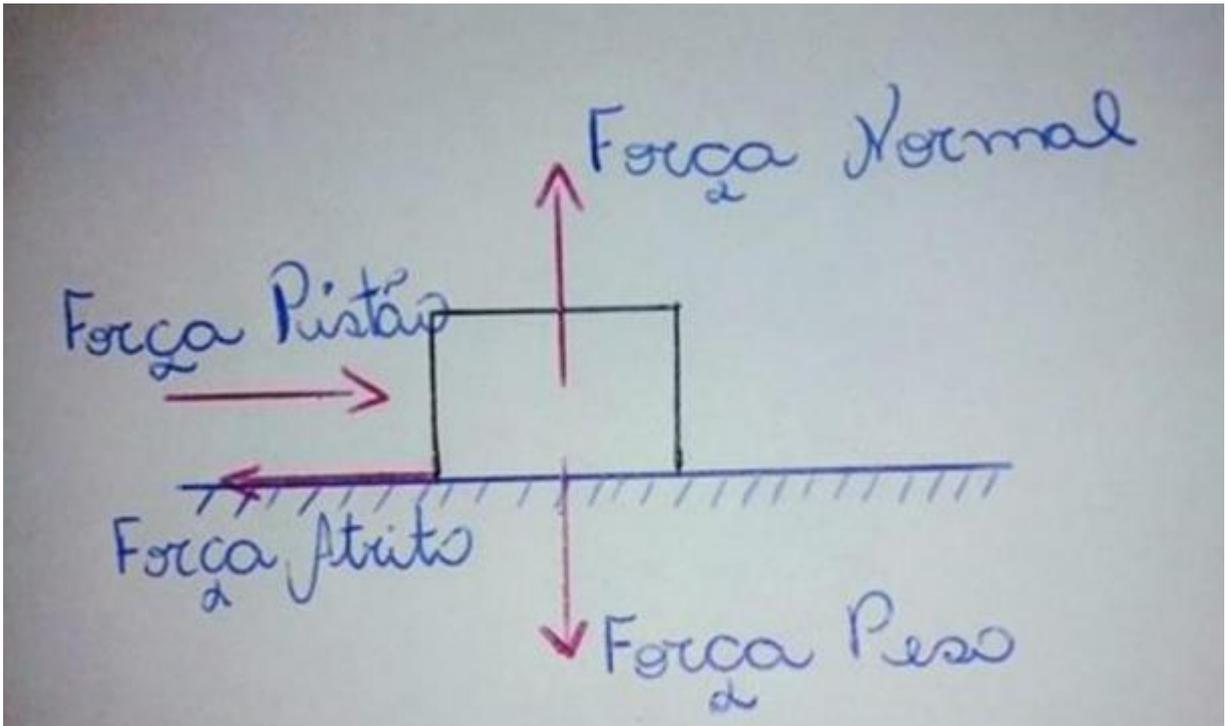
Para determinar se a matriz de coeficientes é uma transformação linear foi feito determinados cálculos (ANEXO 27). Sendo verdadeiras as condições $T(u + v) = T(u) + T(v)$ e $T(\alpha u) = \alpha T(u)$, prova que a aplicação é linear.

4.7 Força mínima que o pistão pode exercer sobre os rolamentos

Para o pistão fazer com que os rolamentos tenham um deslocamento para um novo passo da produção, é preciso que ele exerça uma força (Figura 26). Sendo a força mínima o suficiente para vencer a força de atrito. Essa força varia de intensidade de acordo com a distância que o pistão tenha que fazer o rolamento se deslocar. Calculando a força normal do

rolamento, e em seguida, multiplicando pelo seu coeficiente de atrito cinético (Figura 25), encontrou-se que força mínima que o pistão deverá fazer para deslocar o rolamento é de $2,038 \text{ N}$ (ANEXO 28).

Figura 26: Diagrama de forças



Fonte: Próprios autores

4.8 Cálculos no programa MATLAB

Segue em ANEXO 29 alguns cálculos realizados no decorrer do projeto no programa MATLAB.

5.0 RESULTADOS OBTIDOS

De acordo com as propostas exigidas para o Trabalho Acadêmico Integrador 2 (TAI 2) para uma animação no *Inventor Software* Cad 3D da Autodesk, após os cálculos e aplicações necessárias, foi possível concluir tal proposta como mostra a Figura 27.

Figura 27: Mecanismo de alinhamento (Inventor)



Fonte: Próprios autores

6.0 CONCLUSÃO

Diante todo o conteúdo apresentado neste trabalho, é possível destacar a importância de todos os aspectos para uma possível montagem da máquina. Além de quanto é perceptivo a integração dos conteúdos das matérias usadas para cálculos de dimensionamento, cálculos físicos entre outros. Proporcionando ao grupo um amplo conhecimento sobre o assunto e aplicação das matérias.

7.0 ANEXOS

ANEXO 1

Passo 1 – Análise do processo de medição

A análise do processo de medição é feita com base nos cinco elementos do processo de medição: mensurando, procedimento de medição, condições ambientais, operador e o próprio sistema de medição.

A massa do rolamento é um mensurando invariável cuja definição é clara. O processo de medição envolve cinco medições repetidas entre as quais a massa é retirada e novamente posicionada na balança.

A balança utilizada para as medições foi do laboratório do Instituto Federal de Minas Gerais Campus Arcos, a mesma não apresenta certificado de calibração logo não apresenta a tabela de correções determinadas nas condições de calibração e as respectivas incertezas de calibração, sendo impossível compensar os erros sistemáticos.

Passo 2 – Identificação das fontes de incerteza

Com base na análise do processo de medição, três principais fontes de incerteza são identificadas.

- A repetitividade da balança (R_e), isto é, o fato de as indicações não mostrarem sempre a mesma indicação para medições repetidas. Possui essencialmente uma contribuição aleatória.
- A resolução limitada da balança (R), é outra fonte de incerteza. Indicações que poderiam conter milésimos de grama estão sendo arredondadas para o centésimo par mais próximo. O erro de arredondamento pela resolução limitada é uma fonte de incerteza com contribuição aleatória.
- Foi realizado a pesagem em uma determinada tarde no laboratório que não apresenta nenhuma estrutura, sendo necessário levar em consideração a temperatura do ambiente, a inclinação da mesa onde estava servindo de suporte para a balança e a inexperiência dos operadores. Afetando o processo de medição.

Passo 3 – Correções combinadas

$$C_{comb} = C_{re} + C_r + C_{ccal} = 0,000 + 0,000 - 0,002 = -0,002mm$$

Passo 4 –Quantificação dos efeitos aleatórios

Todas as fontes de incerteza possuem contribuições aleatórias:

●A incerteza-padrão da repetitividade da balança, para a média das cinco indicações é calculada a partir da incerteza-padrão da média das cinco indicações. A incerteza-padrão das indicações é 0,00282 g. A incerteza-padrão das indicações é dividida pela raiz quadrada de cinco, que é o número de dados usados para calcular a média. O número de graus de liberdade é igual ao número de medições repetidas usadas para calcular a incerteza-padrão menos um, portanto:

$$V_{re} = 5 - 1 = 4 \qquad U_{re} = \frac{0,00282}{\sqrt{5}} = 0,00126mm$$

●A incerteza-padrão do erro de arredondamento introduzido pela resolução limitada do dispositivo indicador pode ser determinada assumindo uma distribuição retangular (ou uniforme) com $a = \frac{R}{2}$. Como a distribuição retangular está sendo assumida, o número de graus de liberdade é

$$a = \frac{R}{2} = \frac{0,002}{2} = 0,001$$

$$U_r = \frac{0,001}{\sqrt{3}} = 5,76 \times 10^{-04}mm$$

Passo 5 –Incertezas padrão combinadas

$$\sqrt{U_{re}^2} + \sqrt{U_r^2} = \sqrt{(0,00126)^2} + \sqrt{(0,000576)^2} = 0,00126 + 0,000576 = 0,00184mm$$

$$\frac{U_{comb}^4}{V_{efet}} = \frac{U_{comb}^4}{4} + \frac{U_{comb}^4}{\infty}$$

$$\frac{0,00184^4}{V_{efet}} = \frac{0,00126^4}{4} \rightarrow \frac{1,1462 \times 10^{-11}}{V_{efet}} = \frac{2,5204 \times 10^{-12}}{4}$$

$$V_{efet} = 4 \cdot \frac{1,1462 \times 10^{-11}}{2,5204 \times 10^{-12}} \rightarrow V_{efet} = 18,1907$$

$$V_{efet} = 18 \text{ mm} \quad t = 2,149$$

Passo 6 – Incerteza expandida

$$U = u_{comb} \times t = 0,00184 \times 2,149 = 3,95416 \times 10^{-03} \text{ mm}$$

Passo 7 – Resultado de medição

$$R_e = t \times u$$

$$R_e = 2,149 \times 0,130 = 0,278$$

$$RM = \bar{I} + C \pm R_e$$

$$RM = 346,696 + 0,268 \pm 0,278$$

$$RM = 346,964 \pm 0,278 \text{ mm}$$

ANEXO 2

V= volume

r= raio

h= altura

$$V = \pi \times r^2 \times h$$

$$V = \pi \times 50^2 \times 5$$

$$V = 39269,90 \text{ cm}^3$$

ANEXO 3

D= densidade

m= massa

v= volume

$$D = \frac{m}{v}$$

$$m = D \times v$$

$$m = 7,85 \times 39269,90$$

$$m = 308268,71 \text{ g/cm}^3$$

$$m = 308,26 \text{ kg/cm}^3$$

ANEXO 4

A= área

b= largura do percurso

a= tamanho do percurso

$$A = b \times a$$

$$A = 7,5 \times 51,4$$

$$A = 385,5 \text{ cm}^2$$

ANEXO 5

A= área

r= raio

$$A = \pi \times r^2$$

$$A = \pi \times 8,6^2$$

$$A = 232,35 \text{ cm}^2$$

ANEXO 6

A_L = área livre

A_T = área total

A_C = área do círculo central

$$A_L = A_T - A_C$$

$$A_L = 6361,72 - 232,35$$

$$A_L = 6129,37 \text{ cm}^2$$

ANEXO 7

l= soma do raio de 2 rolamentos

$$\frac{1}{3} \times 6 \times \left(\frac{4\sqrt{3} - \pi}{8} \right) \times l^2$$

$$\frac{1}{3} \times 6 \times \left(\frac{4\sqrt{3} - \pi}{8} \right) \times 7,2^2 =$$

$$49,07 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{rolamento}} + A_{\text{interstício}} =$$

$$40,71 + 49,07 =$$

$$89,78 \text{ cm}^2$$

$$\frac{\text{Área livre da bandeja}}{A_{\text{rolamento}} + A_{\text{interstício}}} =$$

$$\frac{6129,37}{89,78} =$$

$$68,27 \text{ rolamentos}$$

ANEXO 8

x = quantidade de rolamento em 10% da bandeja

$$\frac{100}{10} \times \frac{68,27}{x}$$

$$100x = 682,7$$

$$x = 6,827 \text{ rolamentos}$$

Q_T = quantidade total de rolamentos

$$Q_T - x =$$

$$68,27 - 6,827 = 61,443$$

ANEXO 9

M_T = massa total dos rolamentos

m = massa média de 1 rolamento

Q_T = quantidade total de rolamentos

$$M_T = m \times Q_T$$

$$M_T = 346,696 \times 61$$

$$M_T = 21148,46 \text{ g}$$

$$M_T = 21,15 \text{ kg}$$

ANEXO 10

A= área da esfera

r= raio

$$A = 4 \times \pi \times r^2$$

$$A = 4 \times \pi \times 4^2$$

$$A = 4 \times \pi \times 16$$

$$A = 201,06 \text{ cm}^2$$

ANEXO 11

V= volume

r= raio

$$V = \frac{4}{3} \times \pi \times r^3$$

$$V = \frac{4}{3} \times \pi \times 4^3$$

$$V = 268,08 \text{ cm}^3$$

ANEXO 12

A= área

r= raio

$$A = \pi \times r^2$$

$$A = \pi \times 42^2$$

$$A = 5541,77cm^2$$

ANEXO 13

A_C = área do corredor

$$A_C = \text{Área total da mesa} - \text{Área inferior ao corredor}$$

$$A_C = 7853,98 - 5541,77$$

$$A_C = 2312,21 \text{ cm}^2$$

ANEXO 14

$$\frac{\text{Área do corredor}}{\text{Área da esfera}} =$$

$$\frac{2312,21}{100,53} =$$

23 esferas

ANEXO 15

Fórmulas:

$$1^{\circ} : F_{normal} = massa \text{ do rolamento} \times gravidade$$

$$FN = m \times g \text{ sendo, massa em kg e gravidade } 9,8 \text{ m/s}$$

$$2^{\circ} : velocidade \text{ linear} = velocidade \text{ angular} \times raio$$

$$v = \omega \times r \text{ sendo, } \omega \text{ rad/s e raio em metros}$$

$$3^{\circ} : momento \text{ de inércia} = 0,5 \times massa \times raio^2$$

$$I = 0,5 \times m \times r^2 \text{ sendo, massa em kg e raio em metros}$$

$$4^{\circ} : torque = momento \text{ de inércia} \times aceleração \text{ angular}$$

$$\tau = I \times \alpha \text{ sendo, } I \text{ N.m e } \alpha \text{ rad/s}^2$$

$$5^{\circ} : Força \text{ de atrito máximo} = \mu \text{ estático máximo} \times massa \times gravidade$$

$$F_{at \text{ max}} = \mu \text{ estático máximo} \times m \times g \text{ sendo, massa em kg e gravidade } 9,8 \text{ m/s}$$

A matriz dos coeficientes representa a quantidade de cada elemento da matriz das incógnitas é preciso para chegar ao resultado esperado, essa matriz é constante e não deve ser mudada durante os cálculos:

Matriz dos coeficientes 5x5:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A matriz das incógnitas representa cada elemento que é necessário para obter a resposta das formulas, essas incógnitas devem ser preenchidas de acordo com as especificações e com o valor que é passado de cada unidade.

Matriz das incógnitas 5x1

$$\begin{bmatrix} m \times g \\ \omega \times r \\ m \times r^2 \\ I \times \alpha \\ \mu_{est. max} \times m \times g \end{bmatrix}$$

A matriz dos resultados é o valor esperado de cada fórmula. Sendo cada linha um resultado de cada, seguindo a ordem das especificações a cima:

$$\begin{bmatrix} FN \\ v \\ I \\ \tau \\ F_{at max} \end{bmatrix}$$

Tendo assim a equação de matrizes:

$$\begin{array}{l} 1^{\text{ª}} \text{ Equação} \\ 2^{\text{ª}} \text{ Equação} \\ 3^{\text{ª}} \text{ Equação} \\ 4^{\text{ª}} \text{ Equação} \\ 5^{\text{ª}} \text{ Equação} \end{array} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} m \times g \\ \omega \times r \\ m \times r^2 \\ I \times \alpha \\ \mu_{est. max} \times m \times g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} FN \\ v \\ I \\ \tau \\ F_{at max} \end{bmatrix}$$

ANEXO 16

ω = velocidade angular

t = tempo em segundos

$$\omega = \frac{2\pi}{t}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{60}$$

$$\omega = 3,15 \text{ rad/s}$$

ANEXO 17

α = aceleração angular

$\Delta\omega$ = velocidade angular final – velocidade angular inicial

Δt = tempo final – tempo inicial

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

$$\alpha = \frac{3,15 - 0}{5 - 0}$$

$$\alpha = 0,63 \text{ rad} / \text{s}^2$$

ANEXO 18

t= tempo (em segundos)

$$\omega(t) = 0,63 \times t$$

$$\omega(1) = 0,63 \times 1 = 0,63 \text{ rad/s}^2$$

$$\omega(2) = 0,63 \times 2 = 1,26 \text{ rad/s}^2$$

$$\omega(3) = 0,63 \times 3 = 1,89 \text{ rad/s}^2$$

$$\omega(4) = 0,63 \times 4 = 2,52 \text{ rad/s}^2$$

$$\omega(5) = 0,63 \times 5 = 3,15 \text{ rad/s}^2$$

ANEXO 19

I= momento de inércia.

m= massa total= massa bandeja + massa quantidade máxima de rolamento= 308,26 kg+21,15 kg= 329,41 kg

r= raio da bandeja em metros= 0,5

Através da fórmula $I = \int r^2 dm$, se define massa= dm; raio= r; espessura= dr e a densidade superficial da massa= σ . Assim tem-se $\sigma = \frac{M}{\pi R^2}$, sendo $dm = \sigma dA = \frac{M}{\pi R^2} 2\pi r dr$.

$$I = \int_0^R r^2 \frac{M}{R^2} 2r dr = \frac{2M}{R^2} \int_0^R r^3 dr$$

$$I = \frac{2M}{R^2} \frac{r^4}{4} \Big|_0^R = \frac{2M}{R^2} \frac{R^4}{4} = \frac{MR^2}{2} = \frac{329,41 \times 0,5^2}{2} = 41,18 \text{ kg/m}^2$$

ANEXO 20

τ = torque

I = momento de inércia

α = aceleração angular

$$\tau = I \times \alpha$$

$$\tau = 41,18 \times 0,63 \text{ rad} / \text{s}^2$$

$$\tau = 25,94 \text{ N.m}$$

ANEXO 21

m= massa

A velocidade linear (v) é aquela desenvolvida na direção da tangente da circunferência, em cada ponto: $v = \omega \times r$.

r= raio

g= gravidade

$$F_c = m \times \frac{v^2}{r} = \mu \times m \times g$$

$$\mu = \frac{(\omega \times r)^2}{g \times r}$$

$$\mu = \omega^2 \times \frac{r}{g}$$

$$\mu \text{ estático} = \frac{r}{g} \times \omega^2$$

Sendo,

$$\mu \text{ estático máximo} = \frac{r}{g} \times \omega^2$$

Quando o r (raio) passa a ser o maior raio da bandeja que é 0,50 metros.

ANEXO 22

Matriz dos coeficientes 5x5:

$$\begin{bmatrix} \frac{\omega^2}{g} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g & \frac{\omega^2}{g} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g & \frac{\omega^2}{g} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g & \frac{\omega^2}{g} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g & \frac{\omega^2}{g} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g \end{bmatrix}$$

Matriz incógnita 5x1:

$$\begin{bmatrix} r1 \\ r2 \\ r3 \\ r4 \\ r5 \end{bmatrix}$$

Matriz Resposta = μ estático 5x1:

$$\begin{bmatrix} \mu1 \\ \mu2 \\ \mu3 \\ \mu4 \\ \mu5 \end{bmatrix}$$

Substituindo os valores:

Matriz coeficientes \times *Matriz incógnitas* = *Matriz resposta*

$$\begin{bmatrix} \frac{\omega^2}{g} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g & \frac{\omega^2}{g} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g & \frac{\omega^2}{g} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g & \frac{\omega^2}{g} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g & \frac{\omega^2}{g} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r1 \\ r2 \\ r3 \\ r4 \\ r5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu1 \\ \mu2 \\ \mu3 \\ \mu4 \\ \mu5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{3,15^2}{9,8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 9,8 & \frac{3,15^2}{9,8} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 9,8 & \frac{3,15^2}{9,8} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 9,8 & \frac{3,15^2}{9,8} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 9,8 & \frac{3,15^2}{9,8} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 9,8 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,1 \\ 0,2 \\ 0,3 \\ 0,4 \\ 0,5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,101 \\ 0,202 \\ 0,303 \\ 0,405 \\ 0,506 \end{bmatrix}$$

ANEXO 23

$$\begin{bmatrix} \frac{3,15^2}{9,8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3,15^2}{9,8} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3,15^2}{9,8} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{3,15^2}{9,8} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3,15^2}{9,8} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r1 \\ r2 \\ r3 \\ r4 \\ r5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1,0125 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,0125 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,0125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,0125 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1,0125 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ANEXO 24

Condições:

Primeira condição: $T(u+v) = T(u) + T(v)$

Segunda condição: $T(\alpha u) = \alpha T(u)$

$$T = \begin{bmatrix} 1,0125 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,0125 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,0125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,0125 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1,0125 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0125 \times x \\ 1,0125 \times y \\ 1,0125 \times z \\ 1,0125 \times w \\ 1,0125 \times k \end{bmatrix}$$

$$T = (x, y, z, w, k) = (1,0125x, 1,0125y, 1,0125z, 1,0125w, 1,0125k)$$

Sendo,

$$u = (x_1, y_1, z_1, w_1, k_1) \text{ e } v = (x_2, y_2, z_2, w_2, k_2)$$

$$(u + v) = (x_1 + x_2, y_1 + y_2, z_1 + z_2, w_1 + w_2, k_1 + k_2)$$

Verificando se a primeira definição é verdadeira:

$$\begin{aligned} T(u) + T(v) &= (1,0125x_1; 1,0125y_1; 1,0125z_1; 1,0125w_1; 1,0125k_1) \quad + \\ &(1,0125x_2; 1,0125y_2; 1,0125z_2; 1,0125w_2; 1,0125k_2) = \\ &(1,0125x_1 + 1,0125x_2; 1,0125y_1 + 1,0125y_2; 1,0125z_1 + 1,0125z_2; 1,0125w_1 + \\ &1,0125w_2; 1,0125k_1 + 1,0125k_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T(u + v) &= T(x_1 + x_2; y_1 + y_2; z_1 + z_2; w_1 + w_2; k_1 + k_2) = \\ &(1,0125x; 1,0125y; 1,0125z; 1,0125w; 1,0125k) \times (x_1 + x_2, y_1 + y_2, z_1 + z_2, w_1 + w_2, \\ &k_1 + k_2) = \\ &(1,0125x_1 + 1,0125x_2; 1,0125y_1 + 1,0125y_2; 1,0125z_1 + 1,0125z_2; 1,0125w_1 + \\ &1,0125w_2; 1,0125k_1 + 1,0125k_2) \end{aligned}$$

Verificando se a segunda definição é verdadeira:

$$\begin{aligned}
T(\alpha u) &= (1,0125x; 1,0125y; 1,0125z; 1,0125w; 1,0125k) \\
&\quad \times (\alpha x_1, \quad \alpha y_1, \quad \alpha z_1, \alpha w_1, \alpha k_1) = \\
&(1,0125(x_1 \times \alpha); 1,0125(y_1 \times \alpha); 1,0125(z_1 \times \alpha); 1,0125(w_1 \times \alpha); 1,0125(k_1 \times \alpha))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\alpha T(u) &= (1,0125x; 1,0125y; 1,0125z; 1,0125w; 1,0125k) \times (x_1, y_1, z_1, w_1, k_1) \times \alpha = \\
&\alpha = (1,0125x_1; 1,0125y_1; 1,0125z_1; 1,0125w_1; 1,0125k_1)
\end{aligned}$$

ANEXO 25

Matriz dos coeficientes 5x5:

$$\begin{bmatrix} \omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3,15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3,15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3,15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3,15 \end{bmatrix}$$

Matriz incógnita 5x1:

$$\begin{bmatrix} r1 \\ r2 \\ r3 \\ r4 \\ r5 \end{bmatrix}$$

Matriz Resposta :

$$\begin{bmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \\ v4 \\ v5 \end{bmatrix}$$

Substituindo os valores:

Matriz coeficientes × *Matriz incógnitas* = *Matriz resposta*

$$\begin{bmatrix} 3,15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3,15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3,15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3,15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3,15 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r1 \\ r2 \\ r3 \\ r4 \\ r5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \\ v4 \\ v5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 3,15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3,15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3,15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3,15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3,15 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,1 \\ 0,2 \\ 0,3 \\ 0,4 \\ 0,5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \\ v4 \\ v5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 3,15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3,15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3,15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3,15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3,15 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,1 \\ 0,2 \\ 0,3 \\ 0,4 \\ 0,5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,315 \\ 0,630 \\ 0,945 \\ 1,260 \\ 1,575 \end{bmatrix}$$

ANEXO 26

$$\begin{bmatrix} 3,15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3,15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3,15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3,15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3,15 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r1 \\ r2 \\ r3 \\ r4 \\ r5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \\ v4 \\ v5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 3,15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3,15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3,15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3,15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3,15 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r1 \\ r2 \\ r3 \\ r4 \\ r5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 3,15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3,15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3,15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3,15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3,15 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ANEXO 27

Condições:

Primeira condição: $T(u+v) = T(u) + T(v)$

Segunda condição: $T(\alpha u) = \alpha T(u)$

$$T = \begin{bmatrix} 3,15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3,15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3,15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3,15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3,15 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,15 \times x \\ 3,15 \times y \\ 3,15 \times z \\ 3,15 \times w \\ 3,15 \times k \end{bmatrix}$$

$$T = (x, y, z, w, k) = (3,15x; 3,15y; 3,15z; 3,15w; 3,15k)$$

Sendo,

$$u = (x_1, y_1, z_1, w_1, k_1) \text{ e } v = (x_2, y_2, z_2, w_2, k_2)$$

$$(u + v) = (x_1 + x_2; y_1 + y_2; z_1 + z_2; w_1 + w_2; k_1 + k_2)$$

Verificando se a primeira condição é verdadeira:

$$\begin{aligned} T(u) + T(v) &= (3,15x_1; 3,15y_1; 3,15z_1; 3,15w_1; 3,15k_1) \\ &+ (3,15x_2; 3,15y_2; 3,15z_2; 3,15w_2; 3,15k_2) = \\ &(3,15x_1 + 3,15x_2; 3,15y_1 + 3,15y_2; 3,15z_1 + 3,15z_2; 3,15w_1 + 3,15w_2; 3,15k_1 + \\ &3,15k_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T(u + v) &= T(x_1 + x_2, y_1 + y_2, z_1 + z_2, w_1 + w_2, k_1 + k_2) = \\ &(3,15x; 3,15y; 3,15z; 3,15w; 3,15k) \times (x_1 + x_2, y_1 + y_2, z_1 + z_2, w_1 + w_2, k_1 + k_2) = \\ &(3,15x_1 + 3,15x_2; 3,15y_1 + 3,15y_2; 3,15z_1 + 3,15z_2; 3,15w_1 + 3,15w_2; 3,15k_1 \\ &+ 3,15k_2) \end{aligned}$$

Verificando se a segunda condição é verdadeira:

$$T(\alpha u) = (3,15x; 3,15y; 3,15z; 3,15w; 3,15k) \times (\alpha x1, \alpha y1, \alpha z1, \alpha w1, \alpha k1) = \\ (3,15(x1 \times \alpha); 3,15(y1 \times \alpha); 3,15(z1 \times \alpha); 3,15(w1 \times \alpha); 3,15(k1 \times \alpha))$$

$$\alpha T(u) = 3,15x; 3,15y; 3,15z; 3,15w; 3,15k) \times (x1, y1, z1, w1, k1) \times \alpha = \\ \alpha(3,15x1; 3,15y1; 3,15z1; 3,15w1; 3,15k1)$$

ANEXO 28

$$F_{pist\tilde{a}o} = F_{normal} \times \mu_{est\tilde{a}tico}$$

$$F_{pist\tilde{a}o} = Fat_{m\tilde{a}ximo}$$

F_N = força normal

m = massa do rolamento (em kg)

g = gravidade

F_P = força do pistão

C_A = coeficiente de atrito

$$F_N = m \times g$$

$$F_N = 0,346696 \times 9,8$$

$$F_N = 3,3976 \text{ N}$$

$$F_P = F_N \times C_A$$

$$F_P = 3,3976 \times 0,60$$

$$F_P = 2,038 \text{ N}$$

ANEXO 29

	Váriavéis	Unidades	Valores das váriaveis
Força Normal	M	Kg	0,346696
	G	m/s	9,8
Velocidade linear	Ω	rad/s	3,15
	R	m	$0 \leq r \leq 0,50$
μ estático máximo	Ω	rad/s	3,15
	R	m	$0 \leq r \leq 0,50$
	G	m/s	9,80
Áreas circulares	Π	rad	3,141592...
	R	cm	45; 50; 8,6
Volume da esfera	Π	rad	3,141592...
	R	cm	4

```

%Calculo  $\mu$  estático dos rolamentos em 50 pontos do raio da bandeja
%Omega = velocidade angular
%Raio= variação do raio da bandeja
%Gravidade= 9.8 metros por segundos
%Mu=  $\mu$  estático
omega= [3.15];
r=[0:0.01:0.50];
g= [9.8];
mu=(omega^2*r/g)
%Tabela com os resultados do  $\mu$  estático em relação a cada raio
Tabela=[r', mu'];
disp(' ')
%Titulo de cada coluna da tabela
disp(' Raio  $\mu$  estático ');
disp(' metros ');

```

```

disp(' ')
disp(Tabela)
disp(' ')
%Plotagem do grafico de ralção  $\mu$  estático com os 50 pontos do raio
% 'r*' Plota os 50 pontos com * vermelho
plot(r,mu,'r*')
grid ('on')
%Titulo do gráfico
title('Estudo  $\mu$  estático em relação ao raio da bandeja');
%Titulo do eixo X do gráfico
xlabel(' Raio da bandeja variando em 0,01 (m)');
%Titulo do eixo Y do gráfico
ylabel (' $\mu$  estático ');

%Calculo  $\mu$  estático dos rolamentos em 5 pontos do raio da bandeja
%Omega = velocidade angular
%Raio= variação do raio da bandeja em 5 partes de 0.01 metros
%Gravidade= 9.8 metros por segundos
%Mu=  $\mu$  estático
omega= [3.15];
r=[0.1:0.1:0.50];
g= [9.8];
mu=(omega^2*r/g);
%Plotagem do grafico de ralção  $\mu$  estático com os 5 pontos do raio
% 'm' Plotagem com linha roxa
plot(r,mu,'m')
%Define a escala de x e y(xmin xmax ymin ymax)
axis([0.1, 0.6, 0.1012, 0.5063])
grid ('on')
title('\fontname{Arial}Comportamento do  $\mu$  estático em relação ao raio da
bandeja','FontSize',14);
xlabel(' Raio da bandeja variando em 0,10 (m)','FontSize',12);
ylabel (' $\mu$  estático ','FontSize',12);
%Cria uma variavel tabela com o vetore 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
%E vetor com os resultados do  $\mu$  estático
Tabela=[r', mu'];
disp(' ')
%Titulo de cada coluna da tabela
disp(' Raio  $\mu$  estático ');
disp(' metros ');
disp(' ');
disp(Tabela)
disp(' ')

%Calculo força mínima exercida pelo pistão pneumático para movimentar os
%rolamentos
%ForçaPistão=ForçaDeAtritoMáximo
%ForçaPistão= ForçaNormal* $\mu$  estático
%Normal=MassaRolamento(kg).gravidade(m/s)
MR= input('Digite a masa do rolamento em kg ')

```

```
G= input('Digite o valor da força gravidade em m/s ')
N= MR*G
fprintf('A força Normal é igual a %7.3f N.\n ', N)
```

```
%Cria uma variavel com o valor da velocidade angular do movimento de
%rotação da bandeja
Omega=input ('Digite a velocidade angular do movimento de rotação da
bandeja ');
%Se Omega for diferente de 3.15 , então o programa da ERRO
if Omega~=3.15
    disp ('Erro.A velocidade angular do movimento de rotação da bandeja não é
essa.');
```

```
%Se Omega for igual a 3.15 então o programa continua
else
    %Cria uma variavel com o valor do raio da bandeja
    R=input ('Digite o valor do raio da bandeja em metros ');
    %Se raio for maior que 0.50 o programa da erro pois o raio máximo é esse
    if R>0.50
        disp ('Erro. A bandeja tem seu raio máximo de 0.50 metros');
```

```
%Se raio menor que 0 o programa da erro pois não existe raio negativo
elseif R<0
    disp('Erro. A bandeja não possui raio negativo');
```

```
%Se raio maior que 0 e menor que 0.50 então é calculado a velocidade
elseif (R>=0)&(R<=0.50)
    V= Omega*R
%Finaliza os dois if
end
end
```

```
%Calculo área das partes circulares do trabalho
%Área do circulo= pi* raio²
r= input('Digite o valor do raio do circulo em cm ');
Ac= (pi*r^2);
fprintf('A área do circulo é igaul a %7.3f cm².\n ', Ac);
```

```
%Cálculo volume da esfera
r= input('Digite o valor do raio da esfera em cm ');
v=((4*pi*r^3)/3);
fprintf('O volume da esfera é igual a %7.3f cm³.\n ', v)
```

```

%Cálculo Torque
%Torque = momento de inercia * velocidade angular
alpha= input('Digite a velocidade angular da rotação ');
I=input('Digite o momento de inercia da bandeja ');
t=(I*alpha);
fprintf('O torque é igual a %7.3f N.m.\n ', t)

%Calculo da velocidade linear dos rolamentos em 5 pontos do raio
%velocidade linear= ?*r
%? = omega = velocidade angular da bandeja
%r = 5 pontos dos raios
omega= [3.25];
r=[0.1:0.1:0.50];
VL= (omega*r);
%Plotagem do grafico de ralção  $\mu$  estático máximo com os 5 pontos do raio
%'linewidth',3 muda espessura da linha do grafico para mais grosso
plot(r,VL,'linewidth',3)
grid ('on')
%Titulo do gráfico a ser plotado
title('\fontname{Arial}Variação da velocidade linear relação ao raio da
bandeja','FontSize',14);
%Titulo do eixo X do gráfico
xlabel(' Raio da bandeja (m)','FontSize',12);
%Titulo do eixo Y do gráfico
ylabel ('Velocidade Linear','FontSize',12);
%Criar tabela para mostrar resultados
Tabela=[r', VL'];
disp(' ')
%Titulo de cada coluna da tabela
disp(' Raio Velocidade Linear');
disp(' m m/s ');
disp(' ')
disp(Tabela)
disp(' ')

%Resolução sobre o  $\mu$  estático máximo dos rolamentos em 5 pontos do raio da
%bandeja matricialmente
%MC= matriz dos coeficientes
Mc=[1.0125 linspace(0,0,4); 0 1.0125 linspace(0,0,3); 0 0 1.0125 0 0;
linspace(0,0,3) 1.0125 0; linspace(0,0,4) 1.0125]
%Mi= matriz da incognitas = 5 pontos do raio da bandeja
Mi=[0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5]
%Mr= matriz resultante= matriz resposta do  $\mu$  estático máximo dos rolamentos
em 5 pontos
Mr=Mc*Mi

```

8.0 REFERÊNCIAS

ACELORMITTAL. **Avaliação da resistência a tração de ligações aparafusadas em inox.**

Disponível em:

<http://www.constructalia.com/portugues_pt/atualidades/artigos/artigos100/avaliacao_da_resistencia_a_tracao_de_ligacoes_aparafusadas_em_inox#.wwyosytyviv>. Acesso em: 11 jul. 2017.

ALBERTAZZI, Armando; SOUSA, André. **Fundamentos de metrologia: científica e industrial.** 1 ed. São Paulo: Manole, 2008.

ALBERTAZZI, Armando; ROBERTO DE SOUSA, André. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial** . 1. ed. [S.l.]: Manole, 2008.167-209 p. Disponível

em: <<http://ifmg.bv3.digitalpages.com.br/users/publications/9788520421161/pages/-4>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

BRAGA, NEWTON. **Cálculos com motores (mec133).** Disponível em:

<<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/176-automacao/automacao-industrial/3479-mec133>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

BRASIL ESCOLA. **Movimento acelerado, retardado e uniforme.** Disponível em:

<<http://brasilescola.uol.com.br/fisica/movimento-acelerado-retardado-uniforme.htm>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

COLINFURZE; Making a HUGE Fire Tornado #1 Base. Disponível em:

em:<<https://www.youtube.com/watch?v=FgNMJB5UTvI>>. Acesso em: 4 abr. 2017

DANIEL SEVERINO. Disponível em:

<<https://www.youtube.com/user/ProfDanielSeverino/videosf>>. Acesso em: 17 abr. 2017.

DANIEL SEVERINO; Aula 41 | Inventor 2013 | Comando Animação. Disponível em:

<<https://www.youtube.com/watch?v=ajp0G1cajmw>>. Acessado em: 17 abr. 2017.

ESFERAÇO. **Esferas de aço em SP.** Disponível em: <<http://www.esferaco.com.br/esferas-aco-sp-preco.html>>. Acesso em: 07 jul. 2017.

FORÇA DE ATRITO. **Teoria (Referencial Físico Matemático).** Disponível em:

<http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/bitstream/handle/mec/19071/05_teorias_frame.htm>. Acesso em: 02 jun. 2017.

GLOBO.COM. **Movimentos circulares.** Disponível em:

<<http://educacao.globo.com/fisica/assunto/mecanica/movimentos-circulares.html>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física: Mecânica.** 10 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HEFEZ, Abramo; Cecília S. Fernandez. **Introdução à Álgebra Linear.** 2ª. ed. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Matemática, 2016. v. 1. 271p.

IBA MENDES PESQUISAS. **O impacto da maquina a vapor na revolução industrial.** Disponível em: <<http://www.ibamendes.com/2011/04/o-impacto-da-maquina-vapor-na-revolucao.html>>. Acesso em: 07 mai. 2017.

IEZZI, G. et al. **Matemática**: volume único: parte 1. 6 ed. [S.L.]: ATUAL, 2015.

ITA. **Introdução à teoria de erros.** Disponível em: <<http://www.fis.ita.br/labfis24/erros/errostextos/erros2.htm>>. Acesso em: 05 jun.

MANUTENÇÃO PREDEITIVA. **Aumentando a confiabilidade por meio da análise de óleo na indústria.** Disponível em: <<http://www.manutencaopreditiva.com/destaque/aumentando-confiabilidade-por-meio-da-analise-de-oleo-na-industria>>. Acesso em: 17 mai. 2017.

MERCADO LIVRE. **N20 motor dc c/ caixa redução 12v / 100rpm - arduino / robôs.** Disponível em: <http://produto.mercadolivre.com.br/mlb-757365471-n20-motor-dc-c-caixa-reduco-12v-100rpm-arduino-robots-_jm>. Acesso em: 05 jun. 2017.

MUNDO EDUCAÇÃO. **Aceleração centrípeta.** Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/aceleracao-centripeta.htm>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

RESUMO ESCOLAR. **Aceleração média e aceleração instantânea.** Disponível em: <<https://www.resumoescolar.com.br/fisica/aceleracao-media-e-aceleracao-instantanea/>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

SALA DA ELÉTRICA. **Velocidade motor elétrico.** Disponível em: <<https://www.saladaeletrica.com.br/velocidade-motor-eletrico-trifasico/>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

SALES JÚNIOR, W. O. **RELATÓRIO DE ESTÁGIO CURRICULAR ELETROTÉCNICA.** Aracaju: IF Sergipe, 2010. 29 p. Disponível em: <[file:///C:/Users/Talita/Downloads/INSTITUTO FEDERAL DE SERGIPE -.PDF](file:///C:/Users/Talita/Downloads/INSTITUTO%20FEDERAL%20DE%20SERGIPE%20-.PDF)>. Acesso em: 05 jun. 2010.

SLIDESHARE. **Tabela de densidade dos materiais.** Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/oscareustchio1/tabela-de-densidade-dos-materiais>>. Acesso em: 02 jun. 2017.

SÓ FÍSICA. **cinemática no cotidiana.** Disponível em: <<http://www.sofisica.com.br/conteudos/mecanica/cinematica/cotidiano.php>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

SÓ FÍSICA. **Velocidade instantânea.** Disponível em: <<http://www.sofisica.com.br/conteudos/mecanica/cinematica/velocidade2.php>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

SOFTCENTER. **Princípios básicos sobre amarração de cargas.** Disponível em: <<http://www.softcenter.com.br/noticias/transporte/97-principios-basicos-sobre-amarracao-de-cargas.html>>. Acesso em: 02 jun. 2017.

TCO. **Neumatica.** Disponível em: <<http://www.tcoltda.com/neumatica.html>>. Acesso em: 11 jul. 2017.

TELECURSO 2000 PROFISSIONALIZANTE. **Manutenção**. São Paulo. 1997. 284p.

UOL. **Coeficiente de atrito**. Disponível em:

<<http://alunosonline.uol.com.br/fisica/coeficiente-atrito.html>>. Acesso em: 05 jun. 2017.