

Resumo do projeto de graduação apresentado ao DEM/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

MECANISMO DE POSICIONAMENTO DE LASER UTILIZANDO ESPELHOS

Allan Bruno Souza Melo

Agosto/2013

Orientador: Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto

Curso: Engenharia Mecânica

O presente trabalho propõe um mecanismo para o posicionamento dinâmico de um feixe de *laser* sobre um anteparo que esteja sob a ação de vibrações. O intuito deste projeto é permitir que o vibrômetro a *laser* do laboratório de acústica e vibrações da Universidade Federal do Rio de Janeiro possa fazer medições em um conjunto de pontos dispostos na superfície desejada sem que haja, no entanto, a intervenção direta do operador. Para tal será utilizado um sistema de variação de ângulo de espelhos dispostos de forma adequada a fim de permitir a orientação do feixe de *laser* em duas direções.

Abstract of Undergraduated Project presented to DEM/UFRJ as a part of fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

MECHANISM OF POSITIONING A LASER USING MIRRORS

Allan Bruno Souza Melo

August/2013

Advisor: Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto

Course: Mechanical Engineering

This paper proposes a mechanism to dynamically position a laser line over a surface under vibrational influence. The intention of this project is to enable a laser vibrometer used at *laboratório de acústica e vibrações* of the *Universidade Federal do Rio de Janeiro* doing measurements within a range of points located on the analyzed surface without the direct intervention of the operator. For this, a system with a variation of the angles of the mirrors rightly displaced will be used to make the drive of the laser line over the intended surface.

Agradecimentos

Acima de tudo sou grato a Deus, que me permitiu alcançar a tão sonhada conquista de concluir o curso de Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Rio de Janeiro. A Ele também sou grato por ter junto de mim pessoas tão maravilhosas que dão sentido à minha passagem por esta vida terrena.

Agradeço também profunda e sinceramente à minha mãe, Maria Emília, ao meu pai, Marcos Antonio, e à minha irmã, Aline Beatriz, que desde o princípio da minha vida até hoje estiveram sempre ao meu lado, incansáveis na hora de apoiar meus sonhos e projetos e também infinitamente compreensivos e cheios de compaixão na hora de superar as frustrações. A eles meu amor e minha eterna gratidão.

Aos meus amigos e familiares - todos eles – por terem partilhado comigo tantos momentos bons e inesquecíveis e também por estarem sempre comigo nos momentos mais difíceis. Dentre eles meu agradecimento e meu carinho especial aos M.S. .

Aos meus mestres, que me ensinaram não só disciplinas do curso, mas também lições que levarei para a vida inteira. Certamente este selecionado grupo de pessoas marcou de forma irreversível a minha vida e dentre situações favoráveis ou não, tenho certeza que no final desta jornada acadêmica todas elas deixaram seu ensinamento.

A todos que já passaram pela minha vida e me permitiram ser uma pessoa melhor, também deixo meu agradecimento. Tenho plena convicção de que todos, direta ou indiretamente, deixaram uma contribuição na minha vida e por isso sou grato.

Muito obrigado!

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
2 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES: CONCEITOS E DEFINIÇÕES	2
2.1 MANUTENÇÃO	2
2.1.1 Manutenção à demanda	2
2.1.2 Manutenção sistemática	3
2.1.3 Manutenção preventiva	4
2.1.4 Manutenção preditiva	4
2.2 VIBRAÇÕES	5
2.2.1 Classificação das vibrações	5
2.2.2 Vibrações mecânicas	6
2.2.3 Análise de vibrações	7
2.2.3.1 Parâmetros da análise	7
2.2.3.2 Métodos de análise	7
2.2.3.3 Análise de vibrações a <i>laser</i>	8
3 PROJETO DO MECANISMO	10
3.1 OBJETIVO DO MECANISMO	10
3.2 PROJETO DO MECANISMO	10
3.2.1 Possibilidades	10
3.2.2 Escolha do mecanismo de funcionamento	11
3.2.3 Limitações da escolha	12
3.2.4 Esboço inicial do mecanismo	12
3.2.5 Os espelhos	13
3.2.6 Servo-motores	14
3.2.7 Controle do servo-motor	15
3.2.8 Conexão entre espelho e servo-motor	17
3.2.8.1 Suporte do espelho	18
3.2.8.2 Eixos e terminais	20
3.2.9 Estrutura de suporte	27
3.2.9.1 Paredes	28
3.2.9.2 Rolamentos	31
3.2.9.3 Suporte dos servo-motores	32
4 MONTAGEM DO MECANISMO	33
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
6 REFERÊNCIAS	39
ANEXO A – <i>Specsheet</i> do vibrômetro	41
ANEXO B – Desenhos técnicos das peças fabricadas	43

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
2 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES: CONCEITOS E DEFINIÇÕES	2
2.1 MANUTENÇÃO	2
2.1.1 Manutenção à demanda	2
2.1.2 Manutenção sistemática	3
2.1.3 Manutenção preventiva	4
2.1.4 Manutenção preditiva	4
2.2 VIBRAÇÕES	5
2.2.1 Classificação das vibrações	5
2.2.2 Vibrações mecânicas	6
2.2.3 Análise de vibrações	7
2.2.3.1 Parâmetros da análise	7
2.2.3.2 Métodos de análise	7
2.2.3.3 Análise de vibrações a <i>laser</i>	8
3 PROJETO DO MECANISMO	10
3.1 OBJETIVO DO MECANISMO	10
3.2 PROJETO DO MECANISMO	10
3.2.1 Possibilidades	10
3.2.2 Escolha do mecanismo de funcionamento	11
3.2.3 Limitações da escolha	12
3.2.4 Esboço inicial do mecanismo	12
3.2.5 Os espelhos	13
3.2.6 Servo-motores	14
3.2.7 Controle do servo-motor	15
3.2.8 Conexão entre espelho e servo-motor	17
3.2.8.1 Suporte do espelho	18
3.2.8.2 Eixos e terminais	20
3.2.9 Estrutura de suporte	27
3.2.9.1 Paredes	28
3.2.9.2 Rolamentos	31
3.2.9.3 Suporte dos servo-motores	32
4 MONTAGEM DO MECANISMO	33
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
6 REFERÊNCIAS	39
ANEXO A – <i>Specsheet</i> do vibrômetro	41
ANEXO B – Desenhos técnicos das peças fabricadas	43

1 Introdução

A possibilidade de estender o uso de um equipamento já existente num laboratório para uma utilização em condições diversas daquelas para as quais foi projetado permite não só a economia de recursos financeiros como também uma maior abrangência no emprego do mesmo.

A existência de um vibrômetro a *laser* de ponto único no Laboratório de Acústica e Vibrações da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LAVI) permite que sejam feitas leituras das vibrações de um determinado ponto de um equipamento. Embora não seja difícil alterar a direção do feixe de *laser* a fim de mudar o ponto de observação, este procedimento é bastante trabalhoso e exige muita atenção do operador para que seja possível garantir que o ponto desejado seja o ponto medido, além de que qualquer desatenção pode levar a quebra de um aparelho tão sensível.

Para contornar este problema propõe-se um sistema controlado remotamente – ou seja, sem a necessidade da intervenção física do operador junto ao vibrômetro – para a análise de mais de um ponto de medição, transformando o que era um vibrômetro a *laser* de ponto único em um vibrômetro a *laser* de escaneamento.

Com esse sistema em funcionamento é possível não só fazer a medição de diferentes pontos de uma máquina observada como também executar esse processo de forma rápida e segura.

Este projeto tem por finalidade propor um mecanismo que seja capaz de fazer a ponte entre estes dois tipos de vibrômetro, ou seja, transformar um vibrômetro a *laser* de ponto único em um vibrômetro a *laser* de escaneamento.

Para tanto, no segundo capítulo são destacados conceitos e definições de Análise de Vibrações, bem como suas aplicações e sua importância na indústria. O terceiro capítulo aborda o mecanismo, desde seu conceito inicial até a escolha dos componentes e projeto das peças. O capítulo 4 abordará questões relacionadas à montagem do mecanismo. Na conclusão todos os conceitos apresentados convergem para a aplicação do mecanismo proposto na utilização do vibrômetro a *laser*.

2 Análise de vibrações: conceitos e definições

Prolongar a vida útil de equipamentos faz parte da rotina da sociedade atual, principalmente quando se trata de uma organização com fins lucrativos. Isto ocorre porque a substituição total de uma máquina após sua falha, por exemplo, tem, em geral, um custo muito superior se comparado ao que seria gasto para trocar apenas a peça ou o conjunto de peças que levaram à falha.

Esta é a razão pela qual foram desenvolvidos diversos procedimentos de intervenção que visam minimizar os custos do produtor – ou mesmo do consumidor final - aumentando a vida útil total do conjunto. Uma fábrica – por exemplo – pode trocar apenas o óleo lubrificante de um equipamento periodicamente evitando a falha total deste em vez de trocar o equipamento todo por ocasião da falha, gerando uma economia significativa para a fábrica e tornando seu preço competitivo no mercado. Um consumidor – para ilustrar outra situação cotidiana – pode substituir a tela do filtro de água que utiliza em sua residência em vez de trocar todo o aparelho, o que também neste caso gera uma economia de recursos que poderá ser aplicada para outras finalidades.

Todos os conceitos aqui definidos são resultado da convergência das definições apresentadas nas referências bibliográficas.

2.1 - Manutenção

Estes procedimentos são conhecidos como manutenção. Tão importante é a importância da manutenção quando se trata de meios produtivos que existem diferentes tipos de procedimentos visando cobrir a maior gama de necessidades possível. Dentre os principais tipos estão: manutenção à demanda (ou corretiva), manutenção sistemática, manutenção preventiva e manutenção preditiva.

2.1.1 – Manutenção à demanda

A manutenção à demanda ocorre quando há a ocorrência da falha, isto é, o equipamento precisa sofrer uma intervenção para voltar a funcionar, caso contrário ficará improdutivo. Este tipo de manutenção talvez seja o método mais primitivo que exista em utilização. Diante das tecnologias e estudos disponíveis hoje, raramente se justifica a adoção

deste modelo de intervenção porque, em geral, o custo dele é mais elevado do que os demais. Isto ocorre como consequência da falha que não foi evitada e, por isso, danificou outras peças também. Um exemplo muito simples disso é a necessidade de trocar um motor de combustão interna inteiro de um automóvel por ter fundido, fato que poderia ter sido evitado caso o usuário tivesse trocado o óleo lubrificante e o fluido do radiador. Esta troca provavelmente não teria um custo significativo diante do prejuízo final. Além disso, como a falha foi inesperada, as consequências tornam-se imprevisíveis, isto é, tratando-se da indústria, os prazos podem ser perdidos e, com isso, clientes.

Porém, existe outro lado no qual se justifica a manutenção à demanda. As telas de uma colheitadeira agrícola, por exemplo, são trocadas apenas quando se rompem. Pela grande quantidade de telas presentes em uma colheitadeira, torna-se mais interessante utilizar toda a sua vida útil antes de trocá-la em vez de evitar seu rompimento, visto que a falha de uma tela não interfere de forma significativa no processo como um todo.

2.1.2 – Manutenção sistemática

A evolução natural da manutenção à demanda foi a manutenção sistemática. Neste modelo as peças e conjuntos sofrem intervenção independente de seu estado, baseado apenas na vida útil do mesmo. Este método já faz parte do grupo de métodos em que a intervenção ocorre antes da falha, isto é, não há a necessidade de esperar a parada do equipamento para então trocar as peças. Desta forma se, por exemplo, um conjunto falha em média a cada seis meses de uso, a substituição dele ocorrerá dentro deste período. A proximidade da média se dará tanto quanto deseje o gerente da manutenção, isto é, a influência da falha é analisada e, com base nela, é escolhido o momento da troca.

A correia dentada do motor de um automóvel é um exemplo de peça que passa por manutenção sistemática. Tão importante é sua importância para transformar a potência gerada pelo motor em movimento do veículo que sua troca é feita independente de como estejam suas condições e, provavelmente, muito antes do tempo médio de ruptura da mesma, haja vista que tal ruptura durante o funcionamento do motor e com o veículo em movimento pode causar sério acidente.

Em termos de custos, este método é mais econômico que o anterior, visto que apenas a peça que pode causar uma falha é trocada. No tópico precedente foi visto que a falha de

uma peça pode danificar outras peças ou conjuntos do equipamento que estavam em boas condições de uso.

2.1.3 – Manutenção preventiva

Na sequência da evolução dos métodos de manutenção surgiu a manutenção preventiva. Neste modelo, a peça é monitorada antes de ocorrer a intervenção, a fim de evitar sua falha e também para prolongar sua vida útil.

Normalmente este monitoramento é feito pelo usuário, que verifica as condições da peça e, ao observar a possibilidade de ocorrer uma falha, substitui a mesma para evitar a parada não planejada da máquina.

A manutenção preventiva é amplamente utilizada tanto na indústria quanto pelo consumidor final, visto que o acompanhamento do equipamento normalmente não exige qualificação extra do operador e a vida útil das peças e dos conjuntos é prolongada, resultando numa redução de custos em relação à manutenção sistemática.

A pastilha utilizada em um torno, por exemplo, pode ser utilizada até que o operador do equipamento observe que o cavaco retirado da peça começa a ter uma formação mais longa e irregular ou então a qualidade do acabamento superficial da peça passa a ser de menor qualidade. Neste momento, o usuário substitui a peça por outra que esteja menos desgastada (isto é, por outra peça que seja mais nova) e continua sua operação sem, no entanto, ter parado motivado pela quebra da pastilha ou então pelo tempo de vida útil indicado pelo fabricante.

2.1.4 – Manutenção preditiva

A manutenção preditiva é a consequência do desenvolvimento da manutenção preventiva. Observou-se que muitos equipamentos poderiam ser monitorados por meio de uma instrumentação capaz de obter dados sobre a temperatura, coletar informações sobre o óleo ou então analisar a evolução das vibrações do equipamento, por exemplo.

Este modelo é, em geral, o mais caro de todos quando se trata de implementação, visto que exige não só equipamentos para a análise como também pessoal qualificado para operar os equipamentos e analisar as informações. Porém sua implementação é justificada quando o valor econômico do equipamento monitorado é elevado.

Um ventilador industrial pode apresentar vibrações mais altas do que o desejado por causa de um desbalanceamento em seu motor. Estas vibrações podem levar a fadiga e ao colapso da estrutura que suporta este ventilador, por exemplo, causando grandes prejuízos. Neste caso, com os equipamentos adequados é possível observar as vibrações fora do padrão desejado e sugerir uma intervenção para que o problema seja corrigido e a falha seja evitada.

2.2 – Vibrações

Todo movimento repetido periódico pode ser considerado uma vibração. O movimento oscilatório descrito por um pêndulo sustentado por um fio, após ter sido deslocado de seu ponto de equilíbrio – ponto no qual ele não descreve nenhum movimento a menos que haja a ação de forças externas – é uma vibração.

2.2.1 – Classificação das vibrações

As vibrações podem ser classificadas em diferentes tipos baseando-se no foco da observação. Assim, pode-se categorizá-las como livres ou forçadas, não amortecidas ou amortecidas, lineares ou não lineares e determinística ou aleatória.

Uma vibração pode ser classificada como livre (não forçada) caso o sistema, após perturbação inicial, não sofra a ação de forças externas (exemplo do pêndulo). Caso haja a influência de agentes externos no movimento oscilatório, a vibração é então considerada forçada.

Para definir um movimento vibracional como não amortecido ou amortecido deve-se analisar a energia do sistema. Se houver a conservação de energia, tem-se o caso não amortecido. Do contrário, é uma vibração amortecida, isto é, vai perder energia até voltar ao estado de equilíbrio.

Já o comportamento linear ou não linear das oscilações deve-se ao comportamento individual dos componentes básicos de um sistema vibratório (massa, mola e amortecedor). Se eles se comportam de forma linear o sistema pode ser classificado como linear. Se não, será definido como não linear.

A natureza da excitação pode classificar a vibração como determinística ou aleatória. No primeiro caso é possível conhecer a magnitude da excitação que age sobre o sistema

em qualquer instante. No segundo caso isto não é possível e, por isso, é chamado de aleatório.

2.2.2 – Vibrações Mecânicas

As máquinas presentes na indústria sofrem com o fenômeno das vibrações muitas vezes causado pela natureza do equipamento. Uma bomba centrífuga, por exemplo, gera uma vibração devido ao movimento rotativo do rotor. Um motor Diesel também gera vibrações devido ao movimento alternado de seus pistões.

Equipamentos rotativos, em geral, apresentam grande tendência a sofrer com a ação da vibração. As vibrações podem ser causadas pelo desbalanceamento do motor, pelo desalinhamento entre acoplamentos, pela excentricidade – que gerará resultados semelhantes ao desbalanceamento, pelas condições dos mancais, por folgas mecânicas ou por uma série de outras razões.

A consequência disto pode ser analisada em vários aspectos. O risco de acidentes aumenta, visto que pode haver uma quebra inesperada dos componentes do equipamento. Os custos com manutenção também sobem por causa da diminuição da vida útil das peças, forçando uma troca mais frequente do que aquela necessária em um equipamento que esteja funcionando sem a influência destas vibrações. Além disso, pode haver influência na qualidade do produto final, visto que as vibrações podem gerar a perda de eficiência da máquina e sua tarefa pode passar a ser executada com qualidade inferior àquela desejada.

A ocorrência das vibrações pode se tornar tão indesejável ao ponto de atingir a frequência natural de oscilação do equipamento. Quando isso acontece, a amplitude do movimento oscilatório aumenta gradativamente até que haja a falha completa do sistema, sendo necessário substituir o equipamento.

Sabendo disso, é possível controlar a qualidade do processo conhecendo-se a faixa de frequências dentro da qual se pode considerar o trabalho do equipamento como normal. Estar fora desta faixa pode significar a ocorrência dos fatores citados anteriormente, gerando um aumento de custo na produção – o que é altamente indesejado quando se trata da lucratividade do empreendimento.

Este controle pode ser feito eliminando as fontes, isto é, corrigindo o problema – quando isso for possível, isolando as partes sujeitas a vibrações excessivas por meio de amortecedores que absorvam a energia até que as vibrações atinjam níveis toleráveis ou então atenuando a resposta, isto é, fazendo modificações estruturais a fim de que as vibrações do sistema fiquem dentro dos níveis desejados.

2.2.3 – Análise de vibrações

O conhecimento da influência das vibrações no funcionamento de equipamentos não tem relevância se estas não podem ser observadas e controladas. Desta forma, desenvolveram-se algumas formas para analisa-las e, a partir daí, tirar conclusões que permitam a melhoria do processo.

2.2.3.1 – Parâmetros da análise

A análise de vibrações baseia-se em três parâmetros básicos: o deslocamento, a velocidade e a aceleração. Considerando que as vibrações são movimentos harmônicos simples, obtendo uma destas informações é possível obter as outras duas de forma bastante simples.

A escolha do parâmetro a ser analisado depende da causa. A análise do deslocamento é mais indicada quando se deseja identificar causas de desbalanceamento e desalinhamento. No caso da velocidade, pode-se identificar não só as duas causas anteriores como também folgas mecânicas, falta de rigidez, excentricidade e rolamentos defeituosos, entre outras. Já a aceleração pode ser analisada em dois níveis: aceleração RMS (root mean square) e aceleração pico a pico. Este parâmetro é bastante utilizado quando se deseja observar problemas relacionados a rolamentos defeituosos.

2.2.3.2 – Métodos de análise

As vibrações de um equipamento podem ser monitoradas tanto por meio da instalação de acelerômetros em locais apropriados quanto utilizando aparelhos que emitem um feixe de *laser* que incide sobre os pontos desejados e retornam o valor da frequência de oscilação daquele ponto.

Ambos os procedimentos retornam resultados bastante satisfatórios, isto é, a escolha entre um ou outro não está relacionada à qualidade do retorno das informações. O que

diferencia os métodos entre si é a existência ou não do contato entre o aparelho de medição e o equipamento a ser observado.

O método da instalação dos acelerômetros sobre a superfície a ser analisada gera uma interferência entre a máquina e o aparelho de medição. Consequência disso é que, dependendo das condições da análise, o instrumento utilizado para realizar as medições pode interferir no resultado final. Outra possibilidade trata-se da geometria da superfície e da localização do ponto desejado, isto é, se porventura o local a ser observado for de difícil acesso e a instalação dos acelerômetros não for possível – ou então bastante complexa – esta forma de análise pode ser inviável.

Outro método bastante difundido é a análise de vibrações utilizando um aparelho que emite um feixe de *laser*. Este método mostra-se bastante adequado principalmente nas condições sob as quais o método anteriormente citado apresenta dificuldades. Por não haver um contato direto entre o instrumento de medição e o equipamento a ser observado, não há uma influência direta do primeiro no segundo. Outra vantagem deste método é a possibilidade de coletar informações de pontos inacessíveis ao outro método.

2.2.3.3 – Análise de vibrações a laser

Os equipamentos utilizados na análise de vibrações a *laser* podem ser divididos em três aplicações: vibrômetros de ponto único, vibrômetros especiais e vibrômetros de escaneamento (ou multipontos).

Os vibrômetros de ponto único emitem uma linha de *laser* que atinge o objeto em um único ponto e, portanto, são capazes apenas de medir um ponto em condições de vibração. Espera-se que o fenômeno das vibrações ocorra sozinho, isto é, o equipamento observado está nas condições de análise mais simples possíveis. Dos três tipos é o mais simples e, conseqüentemente, o mais barato.

Os vibrômetros especiais têm sua aplicação voltada para situações mais complexas como, por exemplo, vibrações rotacionais, de alta frequência ou então em três dimensões. Estes instrumentos são utilizados para avaliar equipamentos que estejam em condições não tão simples, ou então geometrias de superfície muito complexas.

Por fim, os vibrômetros de escaneamento emitem feixes de *laser* que realizam uma varredura na superfície desejada, retornando a informação não só de um ponto, mas de toda a superfície de forma discretizada – uma vez que os intervalos de medição podem ser ajustados pelo operador do vibrômetro.

3 Projeto do mecanismo

O Laboratório de Acústica e Vibrações da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LAVI) tem um vibrômetro a *laser* de ponto único utilizado na análise de vibrações tanto de equipamentos estudados nos projetos conduzidos dentro do laboratório quanto de equipamentos utilizados na indústria – quando assim solicitados.

3.1 Objetivo do mecanismo

A possibilidade de obter-se um escaneamento de uma superfície usando este aparelho – em vez de comprar um novo – fez com que surgisse a necessidade do projeto de um mecanismo que permitisse, de forma precisa e segura, manipular a variação da direção do feixe de *laser*.

Desta forma, o mecanismo apresentado neste projeto tem como proposta direcionar o feixe de *laser* para pontos previamente escolhidos pelo operador do equipamento, permitindo assim que a medição seja feita em vários pontos de forma mais segura e mais ágil do que a simples alteração da direção do vibrômetro manualmente.

3.2 Projeto do mecanismo

O mecanismo foi desenvolvido em torno de seu objetivo principal, levando em conta sempre a segurança da operação, a agilidade do processo e a precisão.

Além disso, levou-se em conta a simplicidade tanto na hora da fabricação quanto na hora da montagem e do transporte do equipamento auxiliar. Uma fabricação simples permitirá a utilização dos funcionários e equipamentos da própria universidade. A simplicidade na montagem foi considerada em função na necessidade de mobilidade do usuário, isto é, permitir que o mecanismo possa ser montado e desmontado quantas vezes for necessário e levado para onde for preciso.

3.2.1 Possibilidades

Para variar a direção do feixe de *laser* foram observadas duas formas: variar a posição da carcaça do vibrômetro – e com isso variar a direção do feixe – ou então desviar o feixe.

As duas formas apresentam vantagens e desvantagens significativas que foram levadas em consideração antes da escolha.

Se por um lado variar a posição da carcaça minimiza a influência sobre o *laser* e consequentemente sobre a medição, por outro se mostra como uma opção mais arriscada visto que um erro do operador pode resultar no desprendimento do vibrômetro da estrutura do mecanismo, causando até uma quebra do equipamento. Outro aspecto negativo é a robustez dos equipamentos associados à alteração da direção do feixe de *laser*, visto que a carcaça do equipamento tem aproximadamente 2,6 kg de massa, conforme consta no *specsheet* do **Anexo A**.

Quanto à possibilidade de desviar o feixe, leva-se em conta que um sistema utilizando dois espelhos terá uma massa significativamente menor do que a carcaça do vibrômetro, permitindo a utilização de equipamentos menos robustos. O que pesa contra esta possibilidade é a interferência do mecanismo na medição, já que esta passa a estar diretamente em contato com o *laser*. Outro ponto é a necessidade de espelhos especiais, visto que espelhos comuns seriam rapidamente manchados pelo feixe de *laser* além de não oferecerem a refletividade mínima necessária para a utilização com *lasers*.

3.2.2 Escolha do mecanismo de funcionamento

Tendo observado as duas possibilidades sob a ótica descrita anteriormente - segurança, agilidade e precisão - optou-se por elaborar um mecanismo que fosse capaz de desviar a direção do feixe de *laser*.

Tratando-se de segurança, este tipo de mecanismo permite que a carcaça do vibrômetro - com a fonte emissora do feixe - fique posicionada de forma segura sempre, isto é, não há a interação entre o mecanismo e a carcaça, minimizando as possibilidades de erro do operador e preservando o vibrômetro.

Já a agilidade está relacionada tanto à fragilidade da carcaça do vibrômetro e da fonte emissora como também à massa do conjunto. Como o vibrômetro tem uma massa maior do que o conjunto de espelhos - enquanto o primeiro tem aproximadamente 2,6 kg o segundo tem apenas cerca de 0,2 kg - será necessário maior potência para uma mesma variação de ângulo entre os dois. Em relação à fragilidade do vibrômetro, deve haver um cuidado para não submetê-lo a mudanças abruptas de direção a fim de preservar

seus componentes internos. Desta forma, as acelerações angulares são limitadas enquanto à variação da direção do laser não sofre nenhuma limitação.

Da ótica da precisão, é necessário cuidado com ambas as formas propostas, visto que é necessário garantir que o ponto solicitado é o ponto que está realmente sendo medido.

3.2.3 Limitações da escolha

Uma vez escolhida a forma que será trabalhada é preciso que se tome consciência das limitações que ela impõe para que o mecanismo projetado possa trazer os resultados esperados.

Em primeiro lugar, deve-se levar em conta que o ângulo entre o feixe de *laser* e a superfície medida analisada não deve ser superior a 15° - ângulo entre a normal à superfície e a direção de incidência do feixe. Isto se deve ao fato de que ângulos maiores que este limite não permitirão a reflexão do feixe de volta para o vibrômetro.

Em segundo lugar, observa-se que os espelhos utilizados não devem ser espelhos comuns, uma vez que estes espelhos oferecem apenas 85% de refletividade – para *lasers* o desejado é um índice superior a 99% de refletividade – além de que seu material não resiste muito tempo à ação dos feixes luminosos. Com isso, há a necessidade de escolher um tipo de espelho que seja compatível com o uso de *lasers*.

3.2.4 Esboço inicial do mecanismo

Antes de iniciar o projeto do mecanismo foi feito um esboço para orientá-lo.



Figura 1 – Esboço do mecanismo

A partir do esboço foi possível concluir que são necessários dois espelhos: o primeiro para variar as posições ao longo da horizontal e o segundo para variar as posições ao longo da vertical. Além disso, observou-se que a direção de saída do feixe de *laser* não será paralela a sua direção de chegada no mecanismo, mas normal a esta, saindo 90° a direita.

3.2.5 Os espelhos

Como mencionado anteriormente, os espelhos são um fator limitante do projeto. Além disso, pelo esboço, serão os elementos em torno dos quais o mecanismo deverá ser elaborado.

O primeiro passo então foi escolher os espelhos utilizados. Para isso, foi necessário em primeiro lugar encontrar um fornecedor de espelhos especiais para trabalhos com *lasers* e seu representante no Brasil.

Nessa pesquisa chegou-se à Lynx Brasil, representante exclusiva dos produtos desenvolvidos e fabricados pela Newport. Antes de consultar os catálogos do fabricante foi necessário levantar os parâmetros necessários ao espelho.

Tendo em vista a necessidade de alta refletividade do espelho para que não haja problema na coleta das informações, o produto procurado deve ter um índice igual ou superior a 99% de refletividade.

Além disso, o espelho deve ser capaz de suportar a ação de *lasers* sem sofrer manchas, visto que um espelho não adequado ao trabalho com *lasers* pode ser danificado facilmente.

Com essas informações encontrou-se o espelho modelo Newport 20D20DM.10, cujas informações estão na tabela 1. A figura 2 mostra uma imagem ilustrativa do espelho.

Modelo: 20D20DM.10	
Formato	Circular
Diâmetro	2"
Espessura	1/2"
Refletividade	>99%
Limpeza	Acetona ou álcool isopropílico

Tabela 1 – Características do espelho
Fonte: Newport Experience/Solutions



Figura 2 – Espelho Newport
Fonte: Newport Experience/Solutions

3.2.6 Servo-motores

O próximo passo é escolher a forma de acionamento dos espelhos, isto é, como será feita a variação angular deles.

Com o objetivo de fazer um sistema manipulado remotamente escolheu-se utilizar motores elétricos. Posteriormente, analisando as possibilidades oferecidas, optou-se pela utilização de um servo-motor.

A diferença entre servo-motor e motor é que o servo-motor tem a finalidade de efetuar variações angulares enquanto o motor tem o objetivo de transmitir potência ao sistema. Tendo em vista que o propósito do mecanismo é rotacionar os espelhos em pequenos ângulos para que o feixe de *laser* possa varrer a superfície desejada, os servo-motores são mais adequados para o projeto.

Buscou-se um componente leve, compacto e com uma resposta rápida. Embora estes parâmetros sejam um pouco subjetivos, a análise dos catálogos levou ao confronto entre os modelos disponíveis para que passassem a ser objetivos.

Baseado nisso, o modelo escolhido foi o Futaba BLS451 Digital *High-Torque High-Speed* Servo, cujas principais propriedades estão listadas na tabela 2 e uma imagem ilustrativa está representada na figura 3, ambas na página seguinte.

Modelo: Futaba BLS451 High-Torque High-Speed Servo	
Dimensões	40 x 20 x 37 mm
Massa	58 g
Torque a 4,8V	8.5 kgf.cm
Velocidade a 4,8V	0,13 s/60°
Torque a 6V	10,6 kgf.cm
Velocidade a 6V	0,10 s/60°

Tabela 2 – Características do servo-motor
Fonte: Futaba Corporation



Figura 3 – Servo-motor
Fonte: Futaba Corporation

3.2.7 Controle do servo-motor

Uma importante parte do mecanismo é o controle do servo-motor já que seu posicionamento implicará diretamente no resultado da medição. Isso ocorre porque a partir dos ângulos dos espelhos – que estão conectados aos servo-motores –, juntamente com a distância para a superfície observada, é possível determinar qual ponto está sendo medido.

Para tal, uma forma bastante simples de fazer este controle é utilizar uma placa controladora programável. Esta placa programável permite ao usuário inserir uma programação computacional em sua memória e, quando acionada, ela executa os códigos previamente inseridos.

Fazer com que esta parte do procedimento seja simples é muito importante do ponto de vista da agilidade do processo como um todo, visto que uma placa de difícil programação ou então de manuseamento complexo demanda mais tempo de operação durante a análise.

Depois de uma análise criteriosa dos elementos disponíveis no mercado, optou-se por utilizar o Arduino Uno. Esta placa faz parte da família de placas Arduino e pode ser considerada a mais *standard* dentre elas, visto que as demais placas consistem numa variação do Arduino Uno para aplicações mais específicas.

Como critério de praticidade, foram levados em conta principalmente o fato da placa ter uma saída USB comum e sua alimentação poder ser tanto por bateria quanto pela própria porta USB. Na tabela 3 constam as principais informações da placa.

Modelo: Arduino Uno Rev 3	
Dimensões	53 x 68 x 10 mm
Massa	300 g
Tensão de entrada	6 – 20 V
Memória flash	32 kB
Microcontrolador	ATmega328

Tabela 3 – Características da placa controladora
Fonte: Arduino



Figura 4 – Placa controladora
Fonte: Arduino

Uma das grandes vantagens das placas Arduino é a vasta comunidade de pessoas que utilizam e compartilham códigos na internet. Desta forma, é possível encontrar códigos prontos na internet e adaptá-los para a utilização específica. Isso possibilita ao laboratório utilizar a placa em outras aplicações que sejam necessárias dentro de suas atividades, visto que conectá-lo e desconectá-lo ao mecanismo é bastante simples.

3.2.8 Conexão entre espelho e servo-motor

Uma vez escolhidos os componentes que serão utilizados para a operação do mecanismo, é necessário estabelecer como será a interface desses mecanismos e como será a estrutura que apoiará o sistema.

A conexão entre o espelho e o servo-motor tem um grau de complexidade que deve ser observado atentamente, uma vez que não é possível conectar diretamente um elemento ao outro e, além disso, é necessário garantir que o centro de rotação do servo-motor esteja alinhado com a superfície do espelho.

Esta necessidade surge do fato de que, caso isto não seja respeitado, perde-se imediatamente a precisão do ponto observado, tornando os cálculos para a obtenção do ponto medido desnecessariamente mais complexos.

Outro fator importante é a posição sobre a qual o raio *laser* deve incidir sobre o espelho. Observando o espelho como um círculo, o objetivo é fazer com que a incidência ocorra exatamente no centro do primeiro espelho e sobre a linha horizontal do diâmetro no segundo espelho, conforme a figura 5. Esta limitação tem a mesma razão da anterior: tornar os cálculos para a obtenção do ponto medido mais simples.

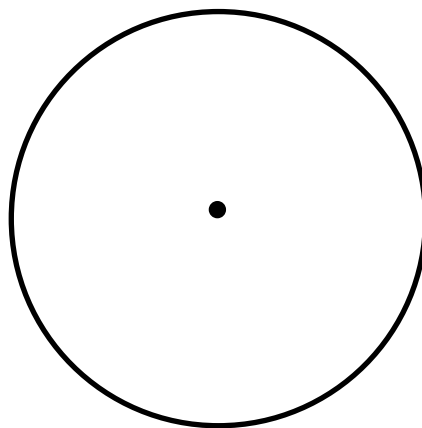


Figura 5 – Espelho 1

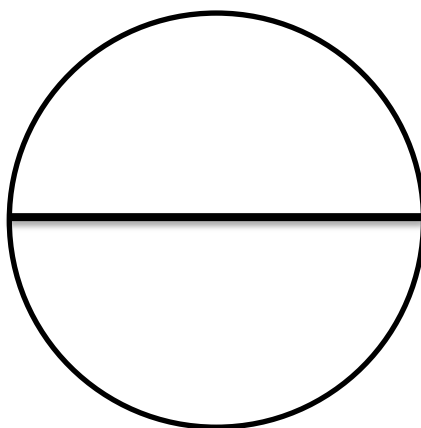


Figura 6 – Espelho 2

A última limitação importante imposta pelos espelhos é que a estrutura de suporte permita que a maior área possível do espelho fique exposta, a fim de evitar danos nesta área pelo contato com a estrutura.

A partir destas limitações, optou-se por dividir a conexão entre espelho e servo-motor em duas partes: a estrutura de suporte do espelho e um eixo com dois terminais que permitam o encaixe tanto no servo-motor quanto na estrutura de suporte do espelho. Todos os desenhos de fabricação deste trabalho encontram-se no **Anexo B**.

3.2.8.1 Suporte do espelho

A estrutura de suporte do espelho é composta por duas partes, formando uma caixa circular com uma tampa. Sugere-se que no fundo da caixa seja colado um pedaço de tecido fino – como TNT, por exemplo – para minimizar os danos do contato entre a caixa e o espelho.

Outra decisão importante foi o determinar que o espelho tenha sua frente voltada para o fundo da caixa. Isto se deve à necessidade de garantir que o centro de rotação do servo-motor coincidirá com o centro da superfície do espelho, conforme citado anteriormente. Esta opção foi feita tendo em vista que as imprecisões de posicionamento, tendo uma montagem no meio, são maiores do que simplesmente a imprecisão que ocorre quando se coloca a face refletiva do espelho no fundo da caixa.

O acoplamento entre a tampa e a caixa será feito primeiramente por encaixe entre as duas e sua fixação será feita com três parafusos M3 x 1,5 x 25 mm com cabeça de fenda. Além desses parafusos de fixação da caixa, o conjunto deverá conter mais dois furos

para receber os parafusos M4 x 0,7 x 30 mm. Tanto os parafusos M3 quanto os parafusos M4 são componentes apenas de fixação, não tendo nenhuma carga significativa atuando sobre eles. Desta forma, não foi necessário efetuar cálculos de resistência estrutural neste caso.

Baseando-se nestas condições, chegou-se aos desenhos da caixa do espelho mostrado nas figuras 7, 8 e 9 a seguir.

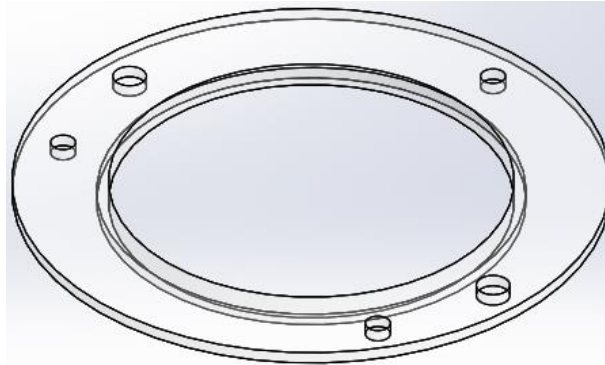


Figura 7 – Tampa da caixa do suporte do espelho

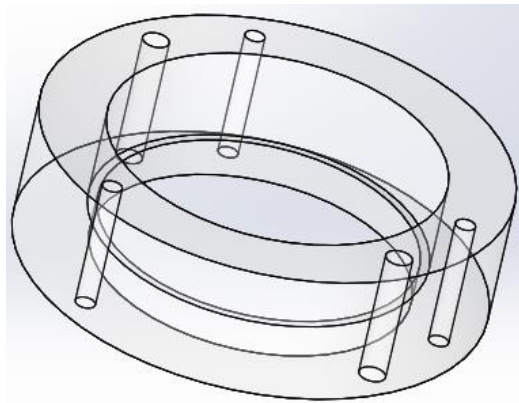


Figura 8 – Base da caixa do suporte do espelho

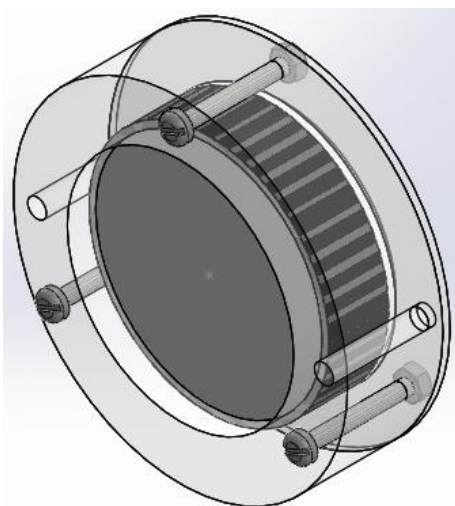


Figura 9 – Montagem da caixa do espelho

A opção por furos de diferentes diâmetros foi feita tendo em vista evitar a confusão por parte do operador de quais furos são destinados à fixação da caixa e quais são destinados ao acoplamento deste primeiro conjunto com o conjunto composto pelos eixos e fixadores. Por fim, os diâmetros de 3 mm e 4 mm tem relação direta com o tamanho total do mecanismo. Para que as peças tenham tamanhos reduzidos – e por consequência massa reduzida – optou-se por diâmetros de parafusos pequenos, exigindo assim uma espessura de parede menor – neste caso, 10 mm apenas.

O material escolhido para a fabricação da caixa foi o acrílico. Esta opção tem relação com a massa específica do material – apenas 1190 kg/m³ ante 2700 kg/m³ do alumínio – e também com sua aparência estética. O acrílico transparente foi escolhido também com o intuito de obter uma melhor aparência.

A última informação importante sobre a estrutura da caixa é a espessura da base da caixa. Esta dimensão será mais bem compreendida após o próximo item, que trata sobre a escolha do eixo e que influencia diretamente na espessura da base da caixa.

3.2.8.2 Eixos e terminais

Depois de elaborado o suporte dos espelhos foi projetado o mecanismo que transmite a rotação do servo-motor ao espelho. Para o desenvolvimento deste transmissor de movimento optou-se por utilizar um conector em U – que será acoplado ao suporte do espelho – ligado a uma extremidade de um eixo. Na outra extremidade será utilizada uma junta de rotação do tipo *Oldham*. Além deste conjunto, outro conjunto eixo-conector em

U será utilizado para acoplar o suporte do espelho ao lado oposto da estrutura de sustentação do mecanismo.

Deste ponto em diante o conjunto que faz a ligação entre servo-motor e suporte do espelho será denominado conjunto 1 e ao conjunto que faz a ligação entre o suporte do espelho e a estrutura de sustentação do mecanismo denominar-se-á conjunto 2.

O eixo do conjunto 1 deve resistir tanto à flexão causada pelo peso do espelho quanto à torção provocada pelo servo-motor. Além disso, este eixo deve conter um ressalto e um rebaixo que servirão de batentes para evitar o deslizamento dentro do rolamento que ficará na parede de sustentação do mecanismo. Para fazer o acoplamento entre o conector em U e o eixo será usado um parafuso M4. Já o acoplamento entre o eixo e a junta rotativa é feita por encaixe.

Indo ao encontro da ideia inicial de projetar um mecanismo leve, optou-se pela utilização do alumínio como material não só do eixo, mas também de toda a estrutura metálica que será utilizada no mecanismo. Na tabela abaixo estão contidas as principais informações sobre o alumínio.

Material: Alumínio	
Massa específica	2.700 kg/m ³
Módulo de elasticidade	69 GPa
Coefficiente de Poisson	0,33
Módulo de cisalhamento	26 GPa
Resistência à tração	124 MPa

Tabela 4 – Características do alumínio
Fonte: ASM Aerospace Specification Metals Inc.

Além de contar com boas propriedades mecânicas para este tipo de utilização, o alumínio ainda tem a seu favor sua resistência à corrosão, que torna o conjunto mais durável além de diminuir as restrições de armazenagem.

Para este eixo foi determinado que seu diâmetro seja igual a 12 mm e seu comprimento, 40 mm . Esta última dimensão tem a ver com as dimensões da estrutura de suporte, uma vez que os espelhos ficam centralizados nela. Já o diâmetro teve dois parâmetros principais levados em conta.

O primeiro foi ter espaço suficiente para que fosse feito o rasgo que servirá de encaixe entre o eixo e a junta rotativa e ainda assim houvesse material suficiente para manter a

resistência mecânica do componente e. O segundo parâmetro considerado foi a resistência à torção, tanto no aspecto de tensão quanto no aspecto da deformação, cuja simulação segue ilustrada abaixo. Para esta simulação utilizou-se o torque máximo entregue pelo servo-motor considerando que o espelho não se mova, isto é, uma situação crítica onde por alguma razão o espelho esteja preso e não possa girar.

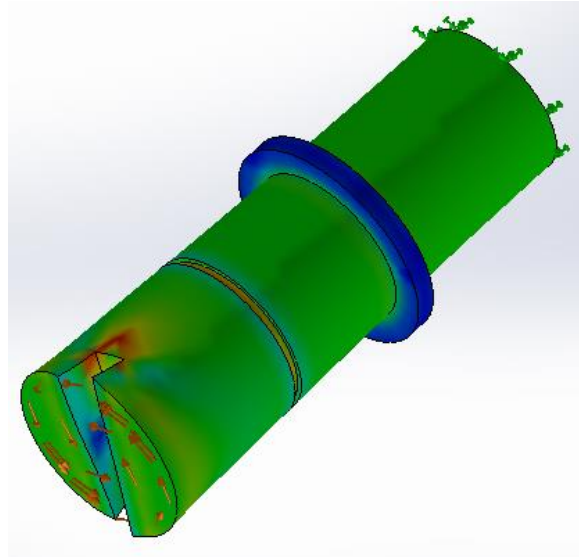


Figura 10 – Análise de tensões no eixo

O coeficiente de segurança de projeto para o eixo é de 2,5 visto que o comportamento real pode gerar desgastes não desejados pelo projeto, como por exemplo, a ocorrência de uma folga entre a junta e o eixo ou então um atrito excessivo por causa da interferência entre esses dois componentes. Desta forma, as dimensões propostas para o eixo apontam para uma tensão máxima de 22 MPa ocorrendo no rasgo feito para o encaixe entre o eixo e a junta rotativa, exatamente 2,5 vezes menor do que o limite de escoamento do material de 55 MPa. Além da simulação de tensão foi feita também a simulação de deslocamento para analisar se o deslocamento do eixo seria também aceitável. O resultado encontra-se na figura 11.

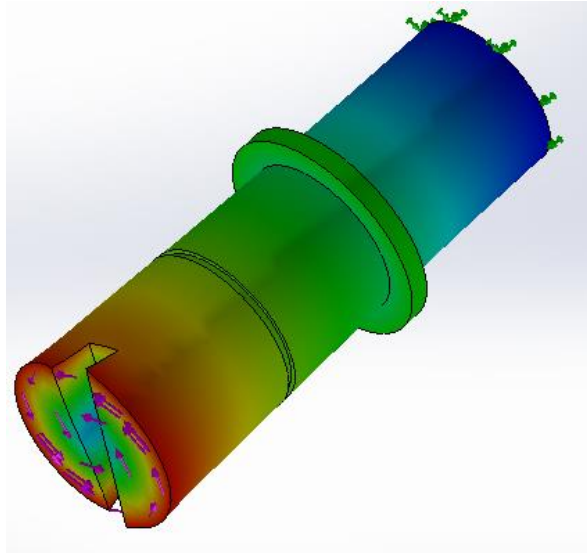


Figura 11 – Análise de deformações

O maior deslocamento relativo será de 0,01 mm , o que está dentro do limite aceitável para esta aplicação.

Os posicionamentos tanto do ressalto quanto do rebaixo têm influência direta da configuração final da estrutura de suporte do mecanismo, visto que estão associados diretamente às posições relativas entre o rolamento, o servo-motor e o suporte do espelho.

A carga relativa ao peso do conjunto e, por consequência, o efeito de tensões de flexão, não exerceu nenhuma influência sobre a geometria do eixo, uma vez que para os parâmetros de projeto o eixo mostrou-se bastante robusto para suportar este tipo de esforço.

O conector que faz o acoplamento entre o suporte do espelho deverá ser feito também de acrílico. Este conector tem três furos M4. O posicionamento do furo que será utilizado pelo parafuso que acoplará o eixo ao conector não é no centro da face, visto que deve ser deslocado, conforme mostra a figura a seguir. Isto se deve ao fato de que este furo associa o centro do eixo à superfície refletora do espelho, conforme discutido anteriormente.

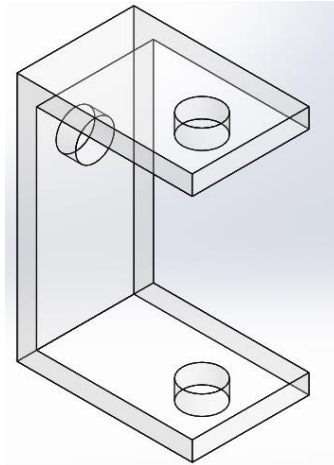


Figura 12 – Conector U entre suporte do espelho e eixo

O último elemento deste conjunto é a junta que une o eixo ao servo-motor. Esta junta tem o objetivo de amenizar os efeitos de um possível desalinhamento entre o eixo mostrado anteriormente e o eixo do servo-motor. Há esta preocupação porque este desalinhamento é inerente à montagem e sua ocorrência gera um desgaste excessivo nos mancais internos do servo-motor, podendo provocar sua quebra. A junta rotativa – do tipo *oldham* – consiste em um disco com ressaltos ortogonais reversos, isto é, cada ressalto está em uma face do disco e o ângulo entre as projeções deles em um plano é de 90 graus, conforme ilustrado na figura abaixo.

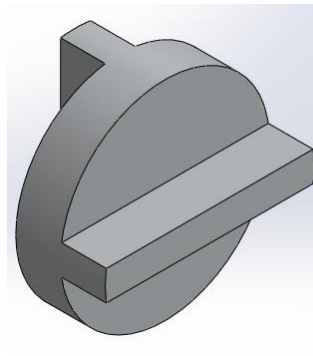


Figura 13 – Junta rotativa

Assim como o eixo, esta junta também foi dimensionada com base nos esforços de torção aos quais será submetida durante seu uso. Além disso, seu diâmetro é 2 mm maior do que o diâmetro do eixo e o encaixe de saída do servo-motor para que seus ressaltos também pudessem ser maiores e, com isso, diminuir a possibilidade de ocorrer um desencaixe principalmente entre a junta e o encaixe de saída do servo-motor, uma vez que

este é vazado para que possa haver um parafuso de fixação acoplado-o ao eixo do ser-vo-motor.

Para a junta foi estabelecido um fator de segurança de projeto igual a 1,4 uma vez que o comportamento da junta pode se afastar um pouco do ideal, isto é, pode haver um atrito – e por consequência um desgaste da peça – causado pela interferência ou então choques causados pela folga, uma vez que as tolerâncias relativas aos acoplamentos da junta devem levar em conta a região do incerto (nem folga nem interferência).

Utilizando elementos finitos para a análise de torção da junta, obteve-se o resultado da figura 14.

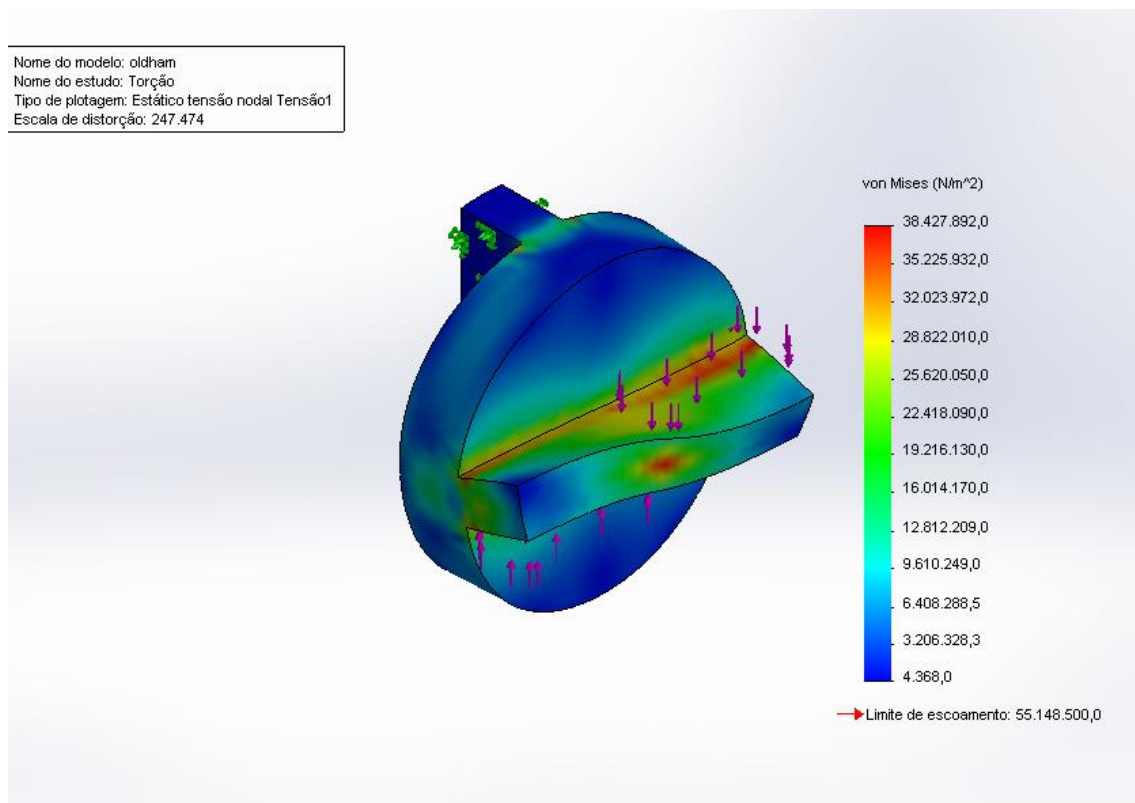
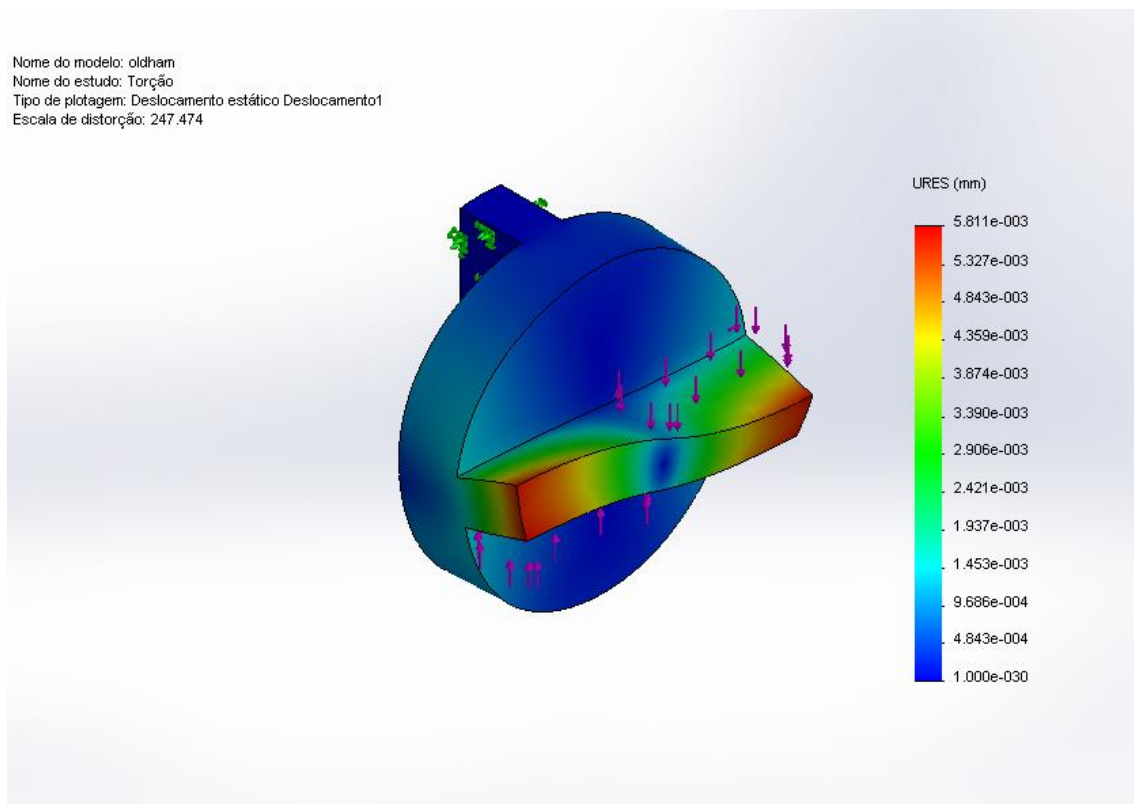


Figura 14 – Análise de torção da junta rotativa

A tensão máxima que ocorrerá na junta é de aproximadamente 38,5 MPa. Utilizando-se o fator de segurança de projeto obtém-se uma tensão máxima aceitável de 39,4 MPa, estando portanto dentro da faixa desejada. A próxima análise é quanto à deformação do elemento, visto que esta peça não deve sofrer deformações significativas para que sua função seja cumprida no sistema. A figura 15 mostra a análise de deformações em que o

maior valor de deformação na peça será igual a 0,006 mm, estando, portanto, dentro do aceitável.



O conjunto 2 utiliza o mesmo conector entre o eixo e o suporte do espelho, apresentando apenas um eixo diferente, além de não haver a necessidade da junta rotativa.

A principal diferença entre os eixos dos conjuntos consiste no comprimento, visto que o conjunto já apresentado exige um acoplamento ao servo-motor, enquanto este eixo tem a função de vincular apenas a estrutura de suporte ao espelho.

Conforme explicado anteriormente, as cargas de flexão provenientes desta configuração são muito pequenas para influenciar na geometria do eixo que teve suas dimensões relacionadas ao outro eixo.

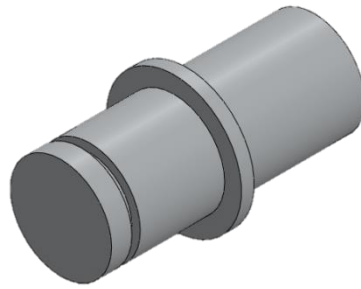


Figura 16 – Eixo do conjunto 2

Uma vez que todos os itens relativos à movimentação dos espelhos já foram apresentados, segue abaixo uma ilustração da montagem completa deste subconjunto do mecanismo, composto por dois eixos, três conectores, um servo-motor, uma caixa com tampa para o espelho, um espelho, quatro parafusos M4 de diferentes tamanhos, três M3 de 25 mm de comprimento e um M5 de 16 mm de comprimento.

Cada eixo tem um furo na direção axial. É necessário abrir rosca nesses dois furos, obedecendo aos padrões previstos para M4 e M5 quanto ao passo.

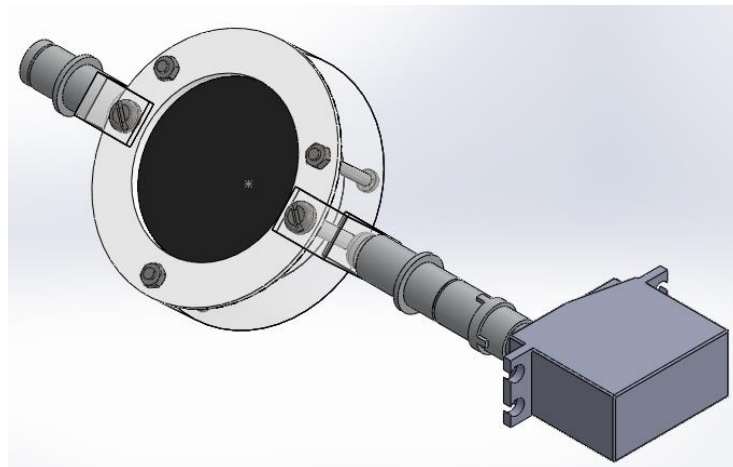


Figura 17 – Montagem do mecanismo que gira o espelho

3.2.9 Estrutura de suporte

Para abrigar o mecanismo mostrado até aqui foi necessário desenvolver uma estrutura que servisse de suporte tanto ao servo-motor quanto aos eixos. Esta estrutura tem como objetivo ser tão compacta e leve quanto seja possível sem, no entanto, comprometer a segurança do sistema.

Esta estrutura foi dividida nas três partes que a compõem: paredes, rolamentos e suporte dos servo-motores e será explicada nos subitens a seguir.

3.2.9.1 Paredes

A estrutura de sustentação do mecanismo tem mais a função de posicionar espacialmente os componentes do que resistir a esforços. Isto ocorre porque os componentes envolvidos são bastante leves os esforços de rotação dos espelhos não exercem influência significativa nos suportes.

Isto significa que o projeto das paredes da estrutura se desenvolve em torno do posicionamento dos rolamentos e dos suportes do servo-motor. Conforme citado anteriormente, o material escolhido para estas paredes foi o alumínio.

A configuração das paredes foi desenvolvida de tal forma que duas paredes paralelas fiquem por dentro e as outras duas paralelas por fora. Uma das paredes de cada grupo deverá ter a furação relativa às fixações dos suportes dos servo-motores, cujo diâmetro é de 4 mm e devem conter 15 mm de rosca. E em todas elas deverá haver o espaço para o encaixe do rolamento.

Embora seja necessário que apenas duas das quatro paredes sejam furadas para receberem os suportes do servo-motor, optou-se neste projeto por furar todas para que o processo de montagem e desmontagem seja facilitado.

As paredes internas tem um formato de U. A parte superior da parede é vazada para que o laser possa incidir sobre o espelho. Além disso, a parte inferior da parede é mais grossa para que seja possível inserir um rolamento que apoiará o eixo. As dimensões desta parte da parede – tanto espessura quanto altura e largura – são diretamente relacionadas às dimensões do rolamento escolhido – que será tratado posteriormente.

Também estão presentes nela quatro furos para que seja possível acoplá-las às paredes externas utilizando-se parafusos. Estes furos tem 4 mm de diâmetro e os dois inferiores têm rosca padrão M4. A figura 18 mostra como será a peça.

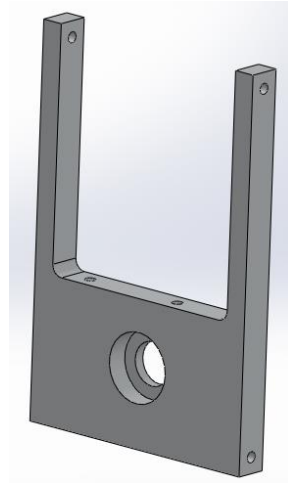


Figura 18 – Parede interna

Já as paredes externas têm um formato mais semelhante a um H. Esta também foi uma opção com o intuito de facilitar a montagem na hora do usuário saber facilmente qual dos pares constitui a parede externa e qual dos pares constitui as paredes internas.

Os mesmos critérios utilizados no desenvolvimento das paredes internas foram aplicados para as paredes externas. Levou-se em conta o posicionamento espacial do espelho – e por consequência do rolamento – e as dimensões do rolamento.

Em ambos os casos a parte externa das paredes tem um batente físico para evitar que o rolamento seja projetado para fora da estrutura por alguma razão, seja um impacto sofrido pelo sistema ou simplesmente pelo escorregamento do mesmo.

No caso das paredes externas, a parte vazada ficou embaixo, uma vez que será neste espaço que o *laser* será projetado.

A figura 19 ilustra o projeto das paredes externas. Observe que o posicionamento dos furos de fixação entre as paredes também é um indicador de qual par é interno e qual par é externo.

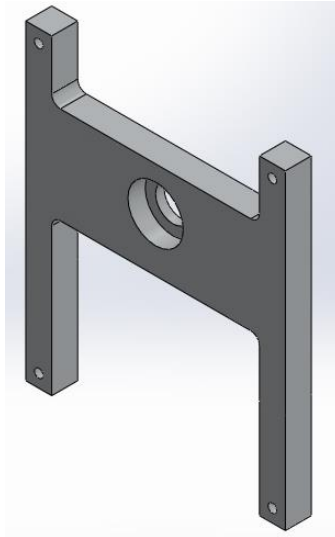


Figura 19 – Parede externa

Com o projeto dos pares de paredes já é possível observar como será a aparência final do corpo do mecanismo. Conforme a ideia inicial de realizar um projeto compacto, as dimensões da estrutura são 180 mm de altura, 150 mm de largura e 150 mm de profundidade.

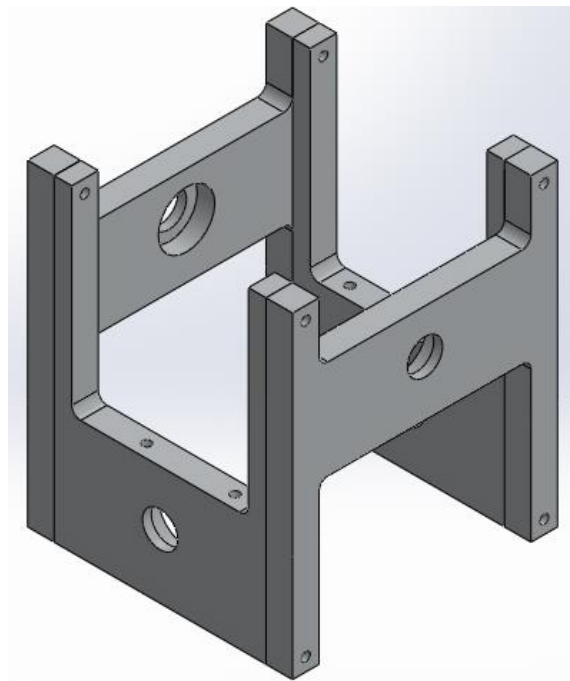


Figura 20 – Montagem das paredes

Concomitantemente ao projeto das paredes foi feita a escolha dos rolamentos e o projeto dos suportes dos servo-motores, uma vez que estes três componentes formarão o conjunto estrutural do mecanismo.

3.2.9.2 Rolamentos

Anteriormente foi feita a opção de transmitir o movimento rotacional do servo-motor ao espelho utilizando-se um eixo. Para que este eixo não fique sustentado apenas pelas sua extremidade acoplada ao motor, aumentando assim sua frequência de oscilação natural, fez-se a escolha de colocar um rolamento acoplado à estrutura de sustentação do mecanismo, permitindo assim que o eixo seja também sustentado por este rolamento. Além disso, o rolamento permite o movimento relativo entre o eixo e a parede da estrutura sem causar nenhum desgaste superficial, gerar atrito ou calor.

Por se tratarem de dois rolamentos – um em cada eixo – definiu-se que o tipo dos rolamentos utilizado no projeto sejam rolamentos auto compensadores de esferas, isto é, sua pista interna tem um grau de liberdade a mais que permite o movimento de rotação em torno dos outros dois eixos além do movimento natural do rolamento. Esta característica permite atenuar problemas de excentricidade dos furos nas paredes paralelas, principalmente no rolamento do conjunto 2 (conjunto que não tem acoplamento ao servo-motor), já que a extremidade do eixo é livre.

Novamente leva-se em conta as que as características do sistema não são rigorosas do ponto de vista de tensões e cargas. Por isso, as análises estática e dinâmica do rolamento não foram feitas para este caso, uma vez que suas características relacionadas aos limites mecânicos estão muito acima do que será exigido do sistema.

A única limitação de dimensão do rolamento é dada pelo eixo. Conforme visto anteriormente, este eixo tem 12 mm de diâmetro e, baseado nisso, escolheu-se o menor rolamento que comportasse este eixo. Assim, analisado o catálogo de rolamentos auto compensadores de esferas da SKF, escolheu-se o rolamento cuja designação é 1201 ETN9. As características do rolamento bem como uma foto ilustrativa seguem na tabela 5 e figura 21, ambas na página a seguir.

Modelo: 1201 ETN9	
Diâmetro interno	12 mm
Diâmetro externo	32 mm
Largura	10 mm
Carga estática	1,43 kN
Velocidade limite	32000 rpm

Tabela 5 – Características do rolamento

Fonte: SKF



Figura 21 – Rolamento auto compensador de esferas
Fonte: SKF

3.2.9.3 Suporte dos servo-motores

Por fim, a última etapa de projeto foi determinar como seriam as fixações do servo-motor na estrutura do mecanismo. As principais funções destas fixações são posicionar espacialmente o servo-motor e garantir que o movimento angular será transmitido ao eixo, isto é, não haverá o risco do motor girar enquanto o eixo permanece parado.

Para fazer a conexão entre a parede e o servo-motor optou-se por um par de fixadores em formato de L. Isto permite que um lado possa ser preso no servo enquanto o outro lado possa ser preso na parede.

Como o servo-motor vem de fábrica com uma furação padrão para fixação, esta furação foi aproveitada e utilizada no suporte. O furo para a fixação entre o suporte e a estrutura do mecanismo obedeceu o padrão utilizado até aqui para fixações estruturais e também tem o diâmetro de 4 mm.

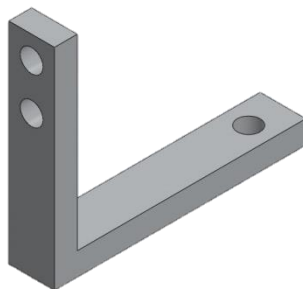


Figura 22 – Suporte do servo-motor

4 Montagem do mecanismo

Conforme descrito ao longo do projeto do mecanismo, uma das grandes preocupações do projeto foi permitir que o usuário pudesse montá-lo de forma rápida antes de realizar as medições.

A seguir, o processo de montagem será descrito levando em conta que todas as peças estão desmontadas com exceção dos rolamentos nas paredes, que devem ser montados uma vez com leve interferência e assim devem permanecer até que se julgue necessário descartar ou o rolamento ou a parede.

A primeira etapa da montagem é colocar o espelho dentro da caixa. Para isso deve-se pegar o espelho cuidadosamente e coloca-lo com a face espelhada na direção da parte de baixo da caixa. Em seguida, coloca-se a tampa e aparafusa-se o conjunto com três parafusos M3.

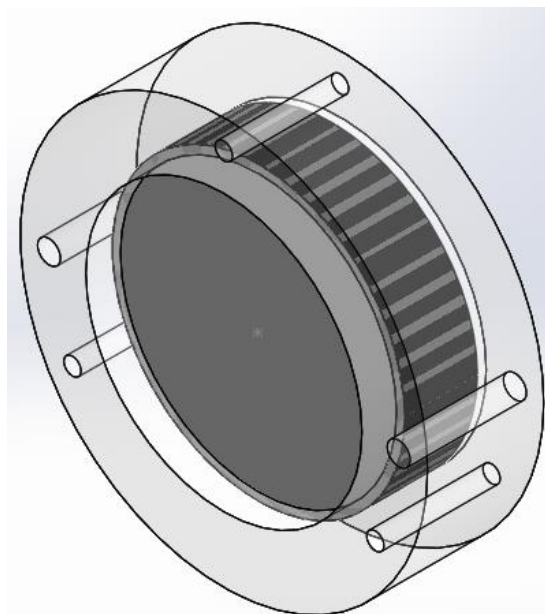


Figura 23 – Espelho acoplado à base da caixa

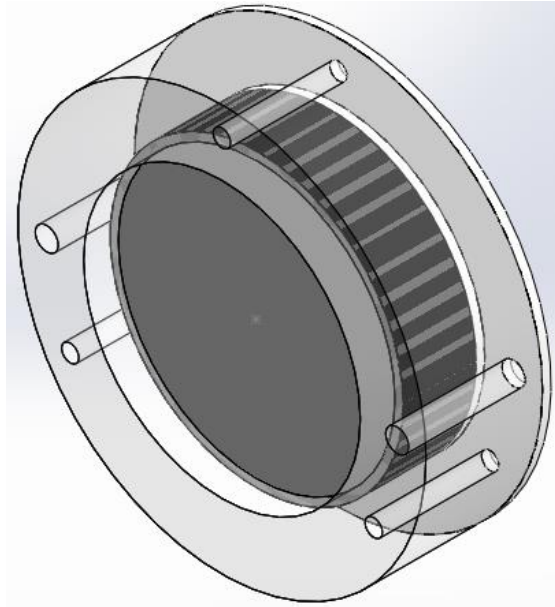


Figura 24 – Espelho acoplado à caixa com tampa

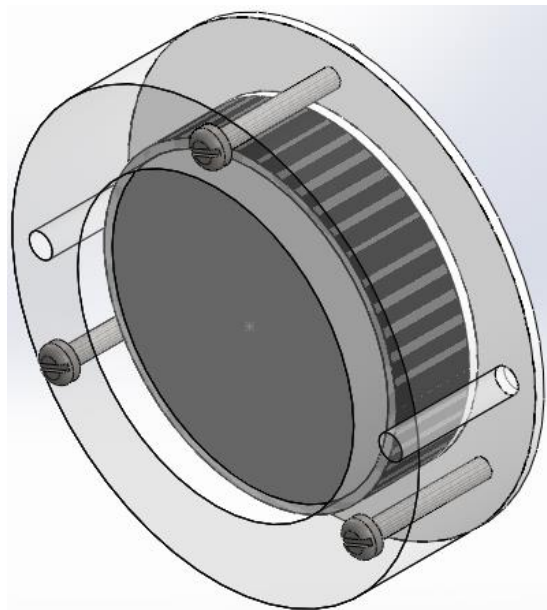


Figura 25 – Conjunto aparafusado

O passo seguinte é montar os conectores nos eixos e depois acoplá-los ao suporte do espelho. Para fazer o acoplamento entre os conectores e os eixos basta colocar a base do U sobre a face furada do eixo e colocar um parafuso M4. Em seguida, acoplam-se os conjuntos eixo-conector no suporte do espelho utilizando um parafuso M4.



Figura 26 – Eixos acoplados aos conectores

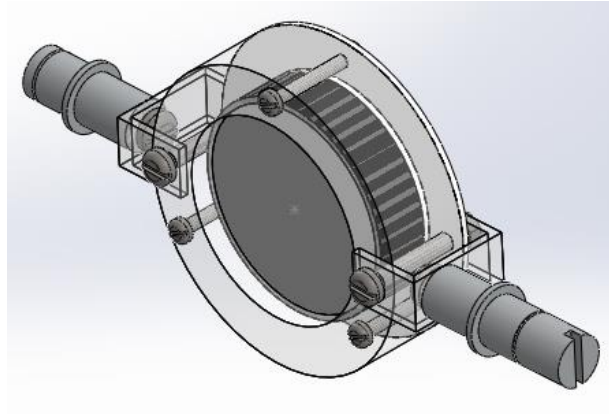


Figura 27 – Eixos e conectores acoplados ao suporte do espelho

A terceira etapa consiste em encaixar os eixos nos rolamentos das paredes. Esta etapa deve ser feita com atenção para evitar danos acidentais ao conjunto. Deve ser observado que os ressalto dos eixos ficam na parte de dentro da caixa da estrutura, enquanto os rebaxos ficam na parte de fora. Isto permite que os eixos sejam montados já com o acoplamento do espelho feito. A alternativa para isso é fazer o encaixe dos eixos nos rolamentos antes de aparafusá-los no suporte do espelho.

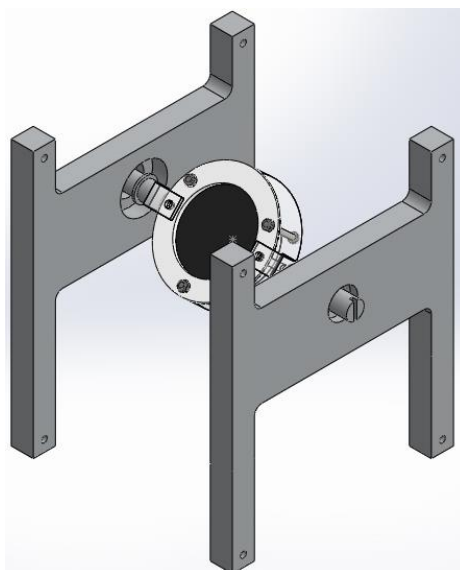


Figura 28 – Eixos acoplados às paredes externas

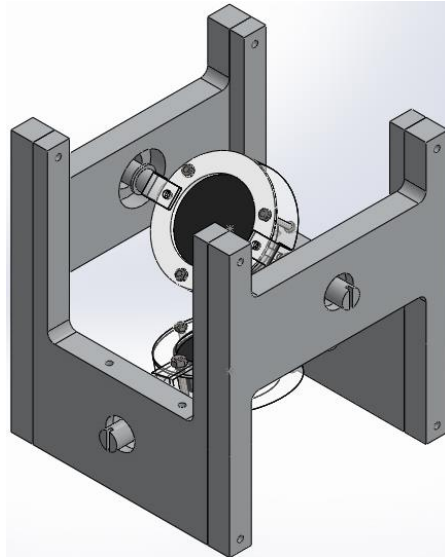


Figura 29 – Montagem do conjunto sem os servo-motor

Depois de feito o posicionamento da figura 29, deve-se aparafusar a estrutura utilizando parafusos M4.

Em seguida fixam-se os suportes do servo-motor à estrutura para permitir o acoplamento entre eles no último passo. Antes, porém, deve-se fazer o acoplamento entre o encaixe de saída e o servo-motor e depois aparafusá-lo. Além disso, quando o acoplamento entre o servo-motor e o eixo for feito deve-se acoplar também – por encaixe – a junta rotativa. Assim, o mecanismo estará pronto para ser utilizado, restando apenas a parte eletrônica (ligar à bateria e ao Arduino).

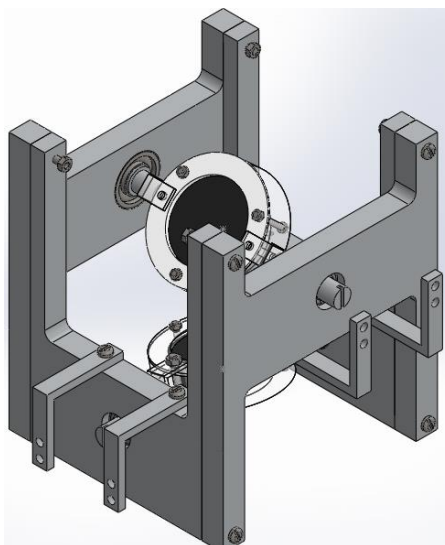


Figura 30 – Conjunto com os suportes dos servo-motores

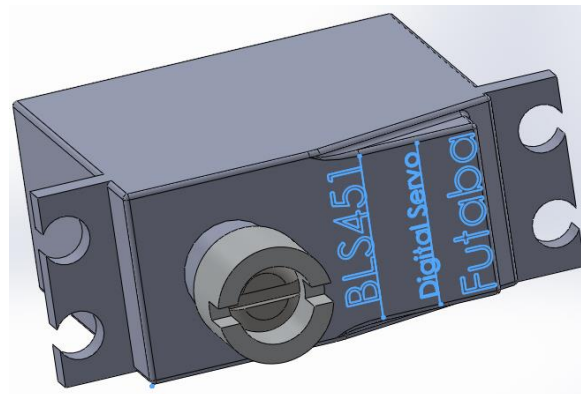


Figura 31 – Conector U aparafusado no servo-motor

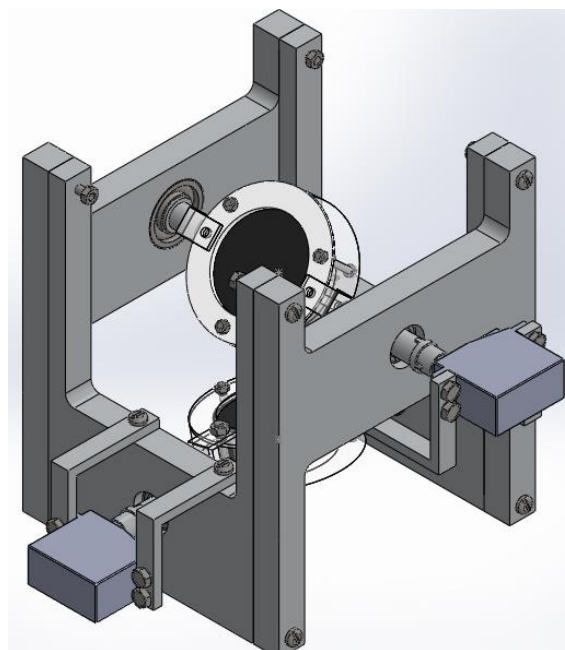


Figura 32 – Mecanismo completo

Mecanismo completo	
Espelhos	2 unidades
Servo-motores	2 unidades
Rolamentos	4 unidades
Peças de acrílico	8 unidades
Peças de alumínio	16 unidades
Parafusos M3	6 unidades
Parafusos M4	22 unidades
Parafusos M5	8 unidades
Porcas M3	6 unidades
Porcas M4	10 unidades
Porcas M5	8 unidades

Tabela 6 – Lista das peças utilizadas

5 Considerações finais

O intuito da proposição do mecanismo apresentado neste projeto é permitir o uso de um vibrômetro a *laser* de ponto único em medições onde há a necessidade da medição de mais de um ponto de análise sem que, no entanto, o operador necessite fazer intervenções diretas no sistema.

Com isso, aumenta-se a produtividade, uma vez que o mecanismo permite a alteração da direção final do feixe de *laser* sem que, no entanto, haja perda de tempo para a alteração da direção do mesmo, isto é, o conjunto de espelhos move-se rapidamente e projeta o laser no novo ponto desejado.

Tendo em vista todas as considerações feitas ao longo do projeto, destaca-se que este projeto é capaz de ampliar a gama de utilizações do vibrômetro. Mesmo assim, alguns cuidados devem ser observados para que a utilização seja feita de forma correta e retorne dados verdadeiramente confiáveis, tal como o ângulo máximo entre o raio incidente sobre a superfície e a normal da superfície inferior à 15°.

A programação da placa controladora Arduino é bastante simples, mas exigirá um estudo prévio da linguagem por parte do operador para que a medição seja feita de forma eficiente. Sugere-se que o operador crie um código-modelo para que seja necessário apenas alterar os pontos de medição antes de realizar as análises.

Por fim, a concepção do projeto levou em conta desde o princípio a segurança operacional, a compactação – e por consequência a facilidade de transporte – e a simplicidade de montagem e operação do mecanismo. Estes três objetivos foram alcançados com êxito na proposta final.

6 Referências

Arduino. Ivrea, Itália: 2013. Disponível em:

<<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>. Acesso em 08/08/2013.

ASM Aerospace Specifications Metals Inc. Pompano Beach, FL USA: [2013].

Disponível em:

<<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061t6> >. Acesso em 08/08/2013.

BANDEIRA, G.; DE ABREU, G.; GIANELLI, R. **Vibração e ruído em manutenção preditiva**. (Trabalho universitário) Bauru: 2010. 22f. Disponível em:

<http://wwwp.feb.unesp.br/jcandido/manutencao/Grupo_12.pdf>. Acesso em 08/08/2013.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**: projeto de engenharia mecânica. Oitava edição. Porto Alegre: AMGH, 2011.

Futaba Corporation. Oshiba, Mobarra, Japão: 2013. Disponível em <<http://www.futaba-rc.com/servos/brushless.html>>. Acesso em 08/08/2013.

Newport Experience/Solutions. Irvine, CA USA: 2013. Disponível em:

<<http://search.newport.com/?q=20D20DM.10>>. Acesso em 08/08/2013.

RAO, S. **Vibrações mecânicas**. Quarta edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SCIESZKO, J. L. (Departamento de Engenharia Mecânica – UFRJ) **Curso: projeto de máquinas I**. 163f

SKF (Referência da tabela). Gotemburgo, Suécia: 2013. Disponível em:

<<http://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/ball-bearings/self-aligning->

ball-bearings/cylindrical-and-tapered-

bore/index.html?prodid=1140011201&imperial=false>. Acesso em 08/08/2013.

SKF (Referência da imagem). Gotemburgo, Suécia: 2013. Disponível em:

<<https://secure.skf.com/br/products/bearings-units-housings/ball-bearings/self-aligning-ball-bearings/index.html>>

VIEIRA, F. **Métodos e técnicas de análise de vibração**. Disponível em:

<<http://mundomecanico.com.br/wp-content/uploads/2011/01/M%C3%A9todos-e-técnicas-de-analise-de-vibra%C3%A7%C3%A3o.pdf>>. Acesso em 08/08/2013

Anexo A

Specsheet do vibrômetro

PDV-100 Technical Data

General Specifications			
Decoder type	DSP velocity decoder, 3 measurement ranges		
Frequency range	0 ... 22 kHz (digital output); 0.5 Hz ... 22 kHz (analog output)		
Measurement ranges	3		
Full scale peak ¹⁾ (mm s ⁻¹)	20	100	500
Scaling factor (mm s ⁻¹ /V)	5	25	125
Velocity resolution ²⁾ (µm s ⁻¹ /√Hz)	<0.02	<0.02	<0.1
Maximum acceleration (m s ⁻²)	2,760	13,800	69,000
Working distance ³⁾	0.1 m ... ~30 m		
Laser safety	Eye-safe class II visible HeNe laser		

¹⁾ Adjustable via the display.

²⁾ The resolution is defined as the signal amplitude (rms) at which the signal-to-noise ratio is 0 dB in a 1 Hz spectral bandwidth (RBW), measured on 3M Scotchlite® tape.

³⁾ The maximum stand-off distance depends on the surface properties of the object.

Output Signals	
Analog velocity output	
Output voltage swing	±4 V (24 bit DAC)
Frequency range	0.5 Hz...22 kHz
Dynamic range ¹⁾	> 90 dB
Calibration accuracy	±1 % (20 Hz...22 kHz)
Digital velocity output	
Electrical S/P-DIF interface ²⁾	24 bit, 48 kSa/s
Frequency range	0...22 kHz
Calibration accuracy	±0.2 % (0.05 Hz...22 kHz)
Output filter	
Digital low pass filter (FIR type)	1, 5, 22 kHz (-0.1dB), roll-off >120 dB/dec
Analog high pass filter	100 Hz (-3 dB), roll-off -60 dB/dec

¹⁾ Defined as spurious free dynamic range (SFDR).

²⁾ S/P-DIF: Sony/Philips Digital Audio InterFace.

Housing and Power	
Dimensions L x W x H	300 mm x 63 mm x 129 mm (11.8 in x 2.5 in x 5.1 in)
Weight	~2.6 kg (~5.7 lbs)
Protection rating	IP 64 (dust and spray water protected)
Power	12 V DC, max. 15 W
Operating temperature	+5 °C...+40 °C (41 °F...104 °F)
Storage temperature	-10 °C...+65 °C (14 °F...149 °F)
Relative humidity	max. 80%, non-condensing
Display	LCD, 3-line, with background lighting
Battery Kit PDV-BS	Rechargeable Li-Ion battery for min. 4 hours operation time

Compliance with Standards	
Electrical safety	IEC/EN61010
EMC	IEC/EN61326
Laser safety	IEC/EN60825-1



Laser Radiation
Do not stare into beam
Class 2 Laser Product
According to IEC/EN 60825-1 (2008)
Complies with 21 CFR 1040.10 and
1040.11 except for deviations pursuant to
Laser Notice no. 50, dated 24 June 2007
P ≤ 1 mW/cw; λ = 633 nm

Polytec GmbH (Germany)

Polytec-Platz 1-7
76337 Waldbronn
Tel. +49 7243 604-0
Fax +49 7243 69944
info@polytec.de

Polytec France S.A.S.

Bâtiment Orion – 1^{er} étage
39, rue Louveau
92320 Châtillon
Tel. +33 1 496569-00
Fax +33 1 57214068
info@polytec.fr

Polytec Ltd. (Great Britain)

Lambda House, Batford Mill
Harpenden, Herts AL5 5BZ
Tel. +44 1582 711670
Fax +44 1582 712084
info@polytec-ltd.co.uk

Polytec Japan

Arena Tower, 13th floor
3-1-9, Shinyokohama,
Kohoku-ku, Yokohama-shi,
Kanagawa, 222-0033
Tel. +81 45 478-6980
Fax +81 45 478-6981
info@polytec.co.jp

Polytec, Inc. (USA)

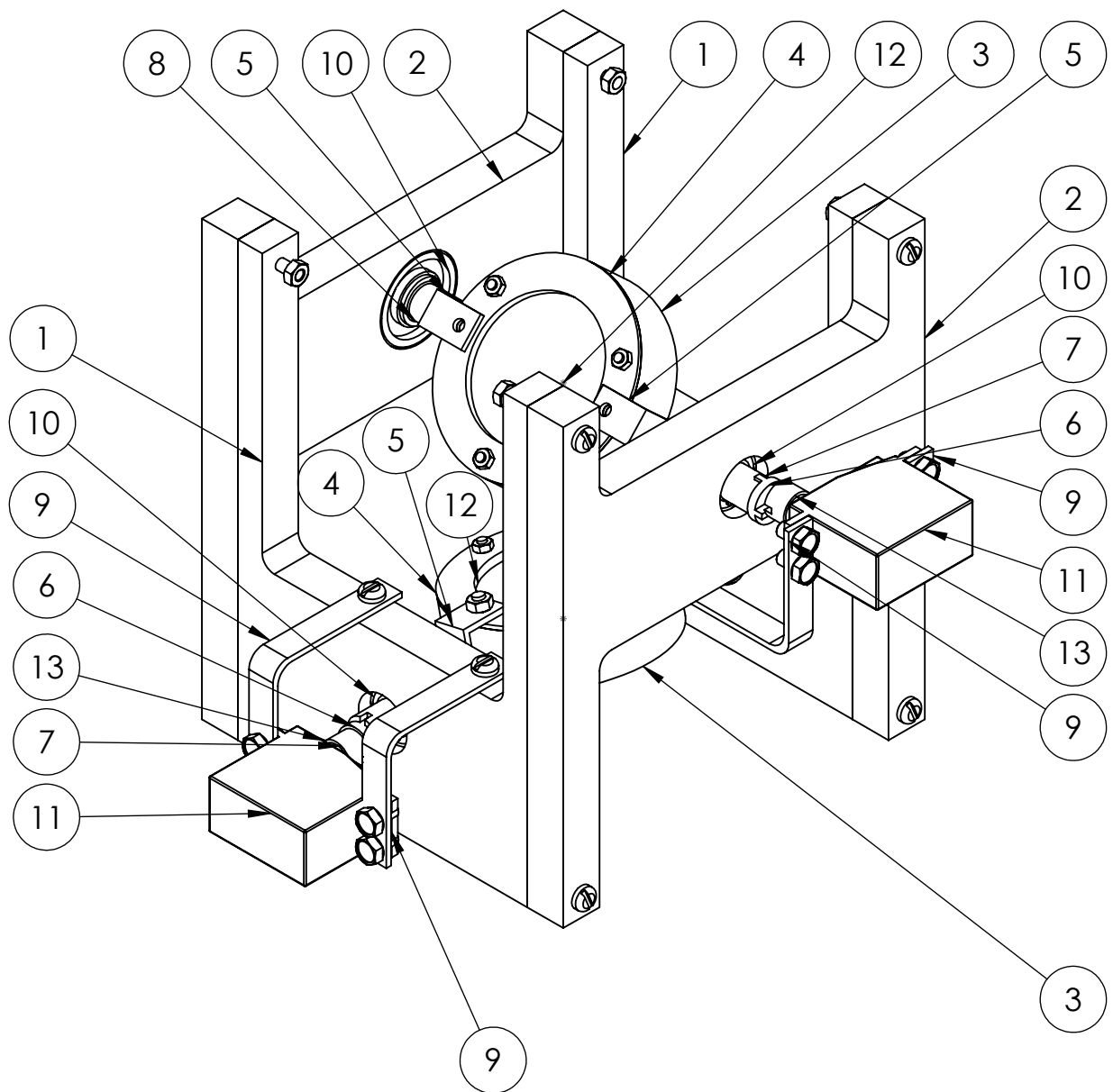
North American Headquarters
16400 Bake Parkway
Suites 150 & 200
Irvine, CA 92618
Tel. +1 949 943-3033
Fax +1 949 679-0463
info@polytec.com

Central Office
1046 Baker Road
Dexter, MI 48130
Tel. +1 734 253-9428
Fax +1 734 424-9304

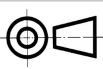
East Coast Office
25 South Street, Suite A
Hopkinton, MA 01748
Tel. +1 508 417-1040
Fax +1 508 544-1225

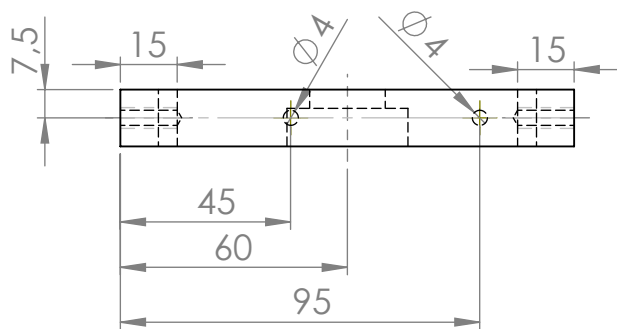
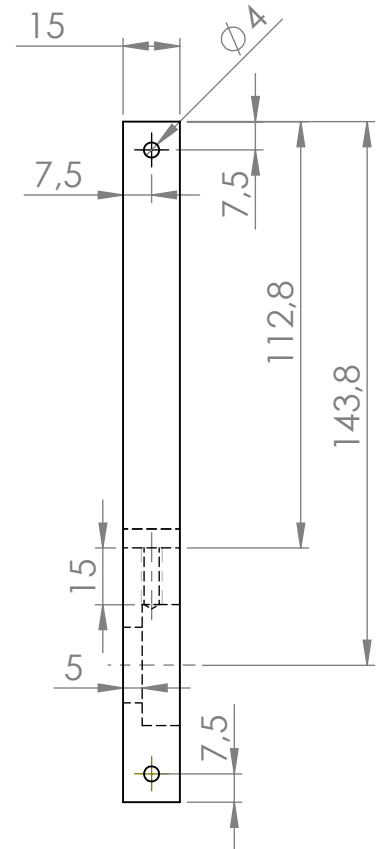
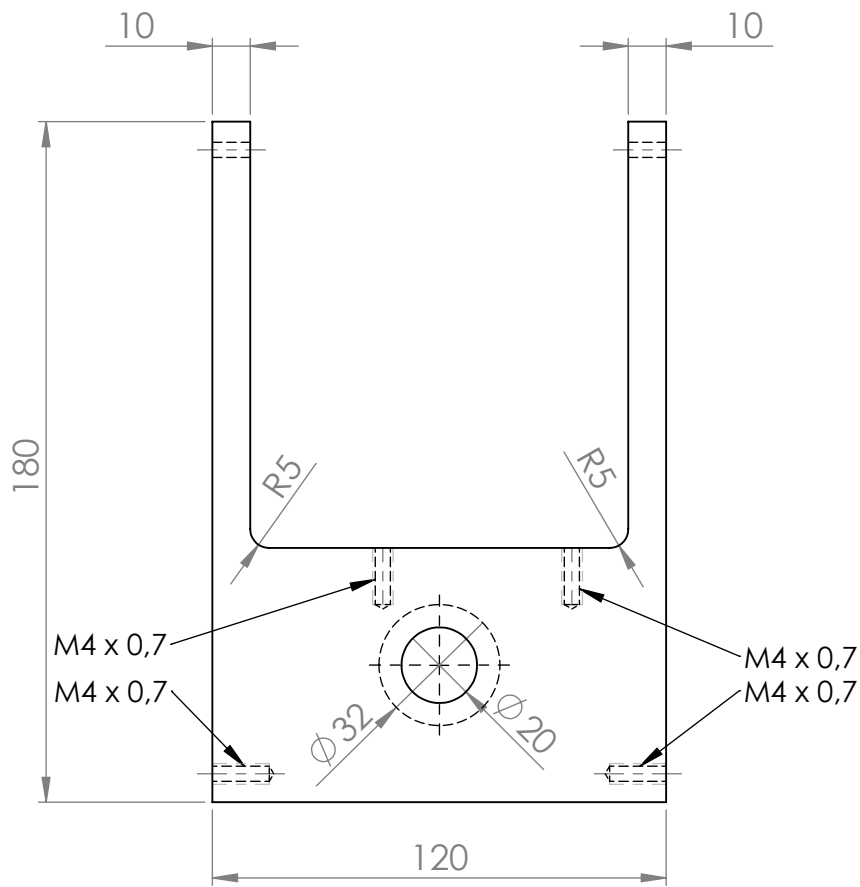
Anexo B

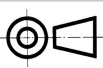
Desenho técnico das peças fabricadas

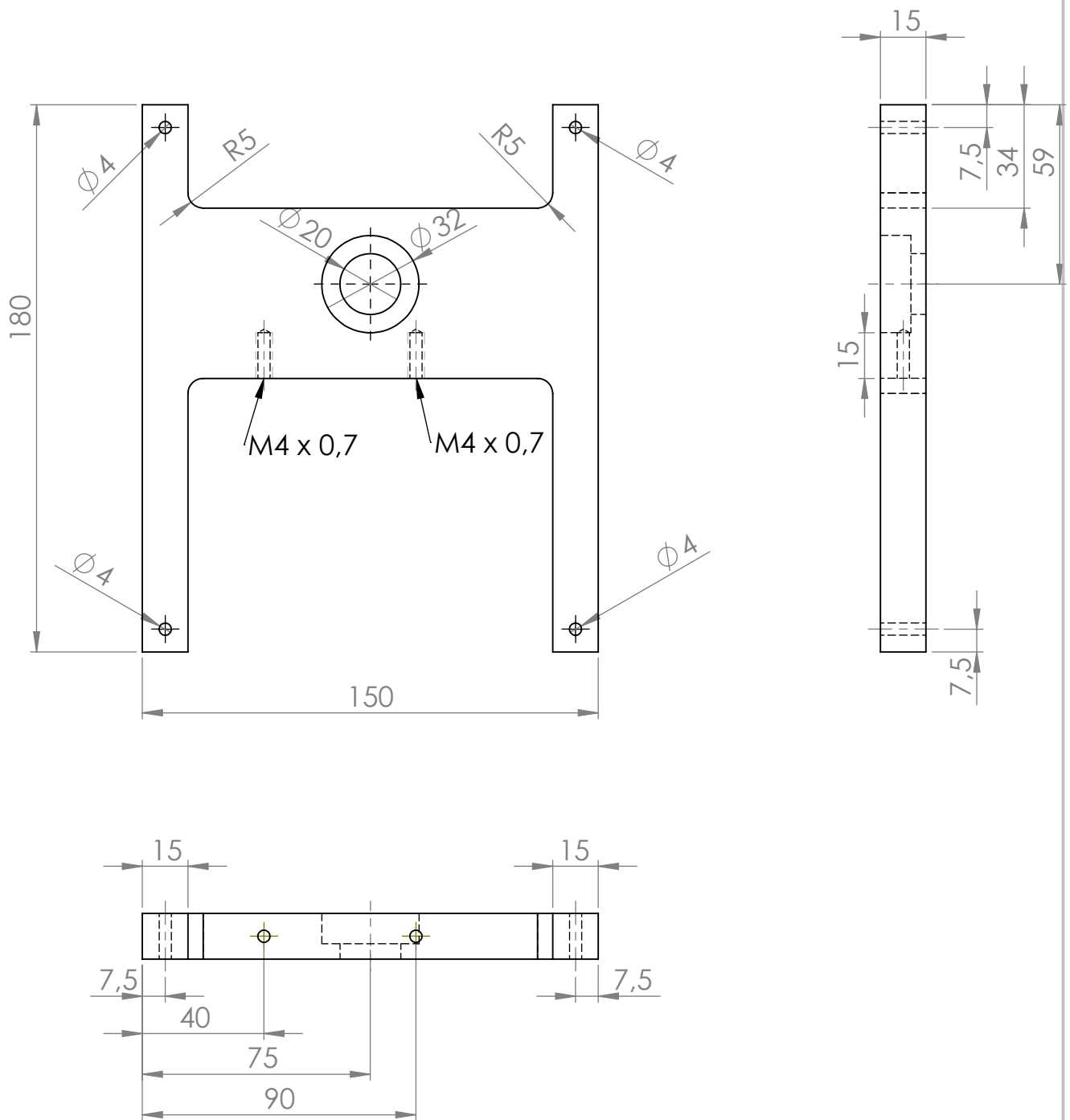


Nº	Peça	Qtd	Ref	Nº	Peça	Qtd	Ref
1	Parede interna	02	ES1	8	Eixo espelho-parede	02	EE6
2	Parede externa	02	ES2	9	Suporte servo-motor	04	ES3
3	Base caixa espelho	02	EE1	10	Rolamentos	04	-
4	Tampa espelho	02	EE2	11	Servo-motor	02	-
5	Conector eixo-espelho	04	EE3	12	Espelho	02	-
6	Junta rotacional	02	EE4	13	Encaixe servo-junta	02	EE7
7	Eixo espelho-servo	02	EE5				

Universidade Federal do Rio de Janeiro		Deptº. de Engenharia Mecânica	
Disciplina Projeto de Graduação		Orientador Fernando A. N. Castro Pinto	
Diedro 	Desenhista Allan Bruno Souza Melo		DRE 108040144
Unidades mm	Tolerância geral N/A	Peça Montagem do mecanismo	
Escala 1:2	Data 09/08/2013	Qtd 01	Material N/A



Universidade Federal do Rio de Janeiro		Dept°. de Engenharia Mecânica	
Disciplina Projeto de Graduação		Orientador Fernando A. N. Castro Pinto	
Diedro 	Desenhista Allan Bruno Souza Melo		DRE 108040144
Unidades mm	Tolerância geral $\pm 0,1$ mm	Peça	Parede interna
Escala 1:2	Data 09/08/2013	Qtd 02	Ref ES1
			Material Alumínio



Universidade Federal do Rio de Janeiro

Deptº. de Engenharia Mecânica

Disciplina Projeto de Graduação

Orientador Fernando A. N. Castro Pinto

Diedro

Desenhista Allan Bruno Souza Melo

DRE 108040144

Unidades mm

Tolerância geral $\pm 0,1$ mm

Peça Parede externa

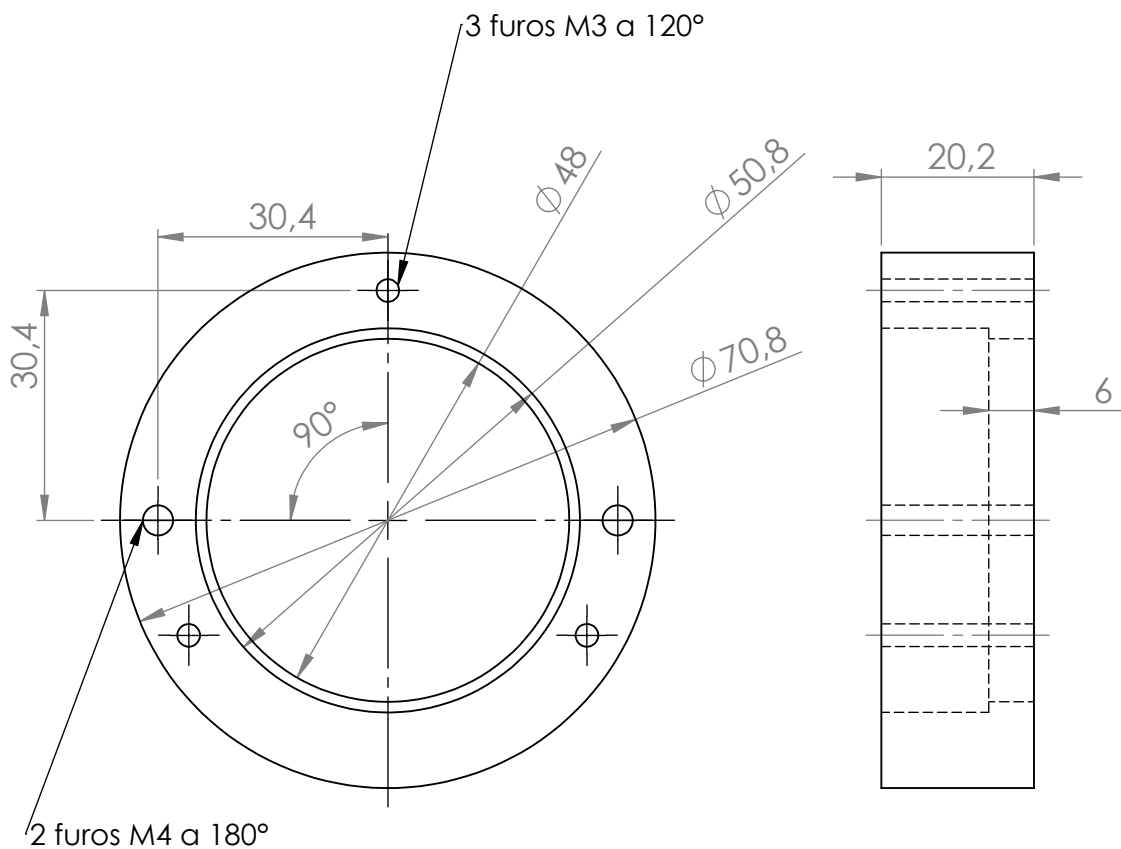
Escala 1:2

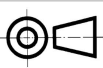
Data 09/08/2013

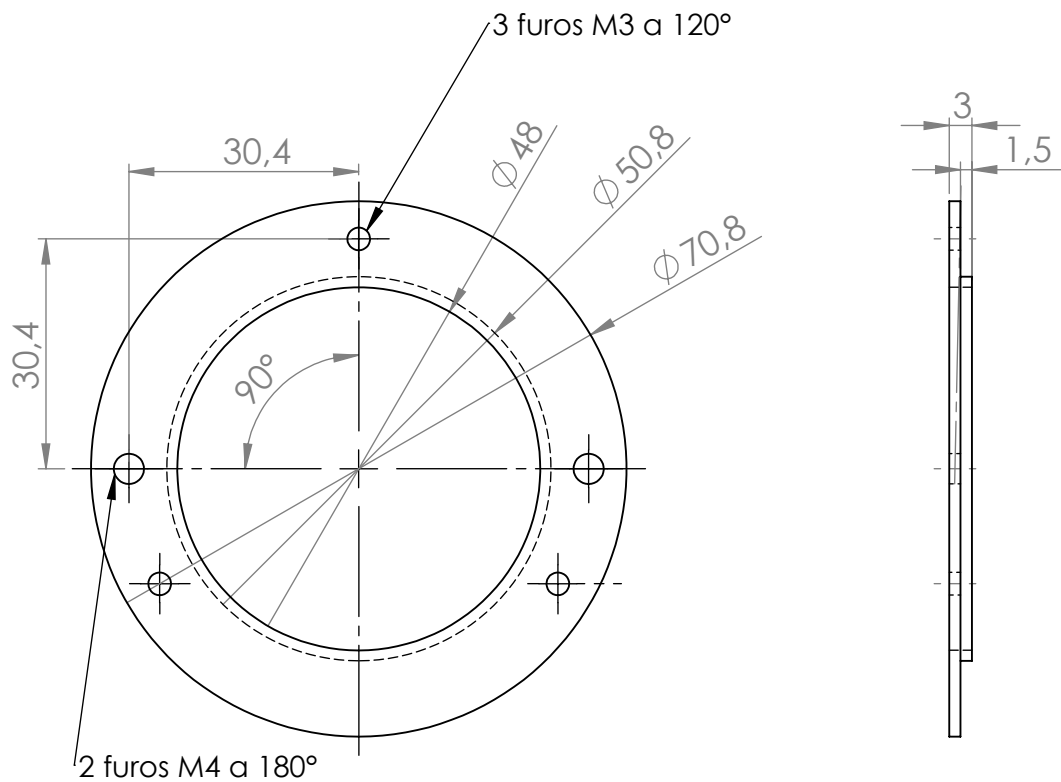
Qtd 02

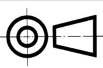
Ref ES2

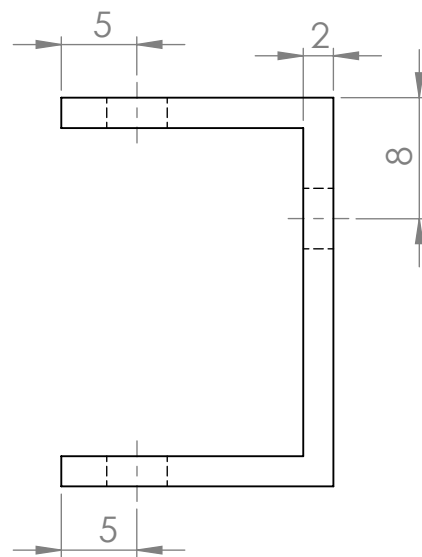
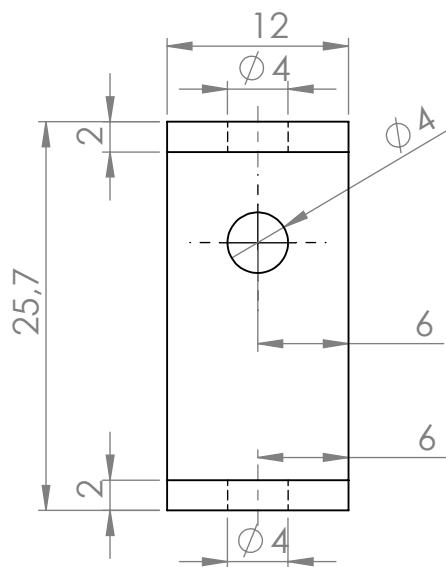
Material Alumínio

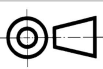


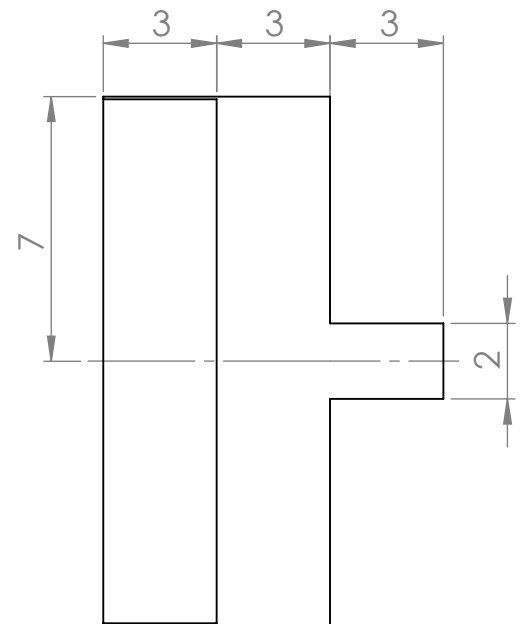
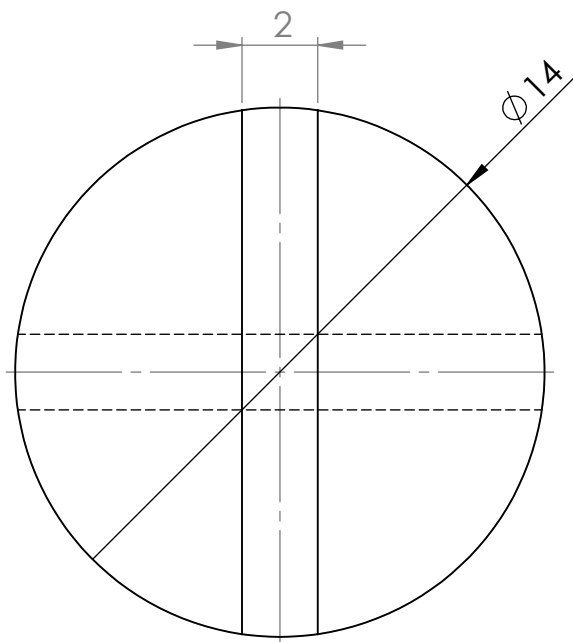
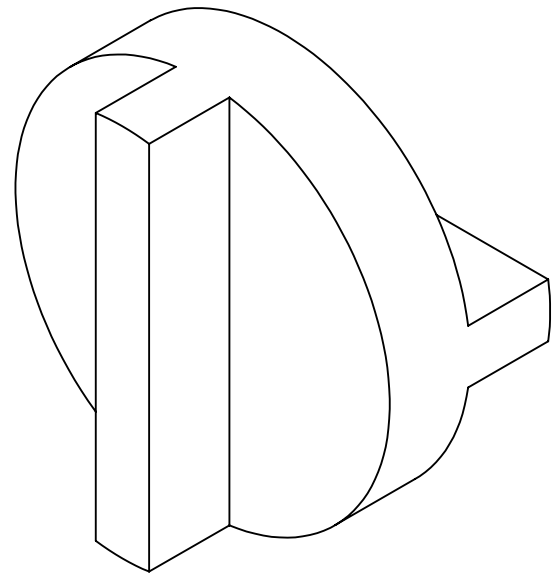
Universidade Federal do Rio de Janeiro		Dept°. de Engenharia Mecânica	
Disciplina Projeto de Graduação		Orientador Fernando A. N. Castro Pinto	
Diedro 	Desenhista Allan Bruno Souza Melo		DRE 108040144
Unidades mm	Tolerância geral ± 0,1 mm	Peça Base caixa espelho	
Escala 1:1	Data 09/08/2013	Qtd 02	Ref EE1 Material Acrílico

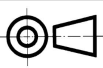


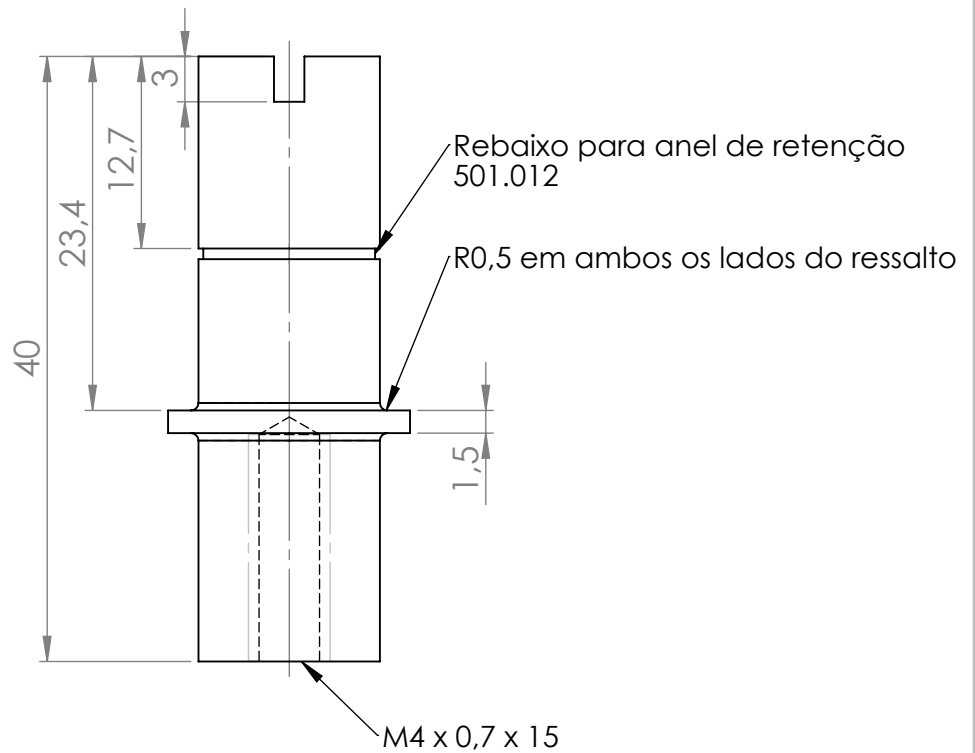
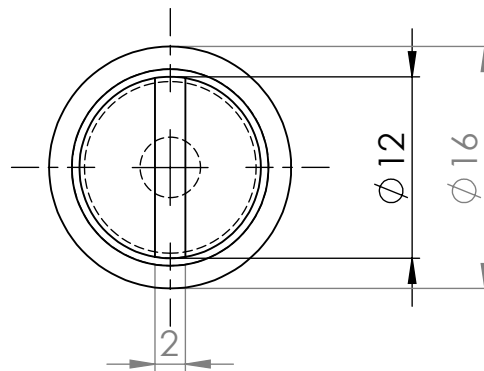
Universidade Federal do Rio de Janeiro		Dept°. de Engenharia Mecânica	
Disciplina Projeto de Graduação		Orientador Fernando A. N. Castro Pinto	
Diedro 	Desenhista Allan Bruno Souza Melo		DRE 108040144
Unidades mm	Tolerância geral ± 0,1 mm	Peça Tampa caixa espelho	
Escala 1:1	Data 09/08/2013	Qtd 02	Ref EE2 Material Acrílico



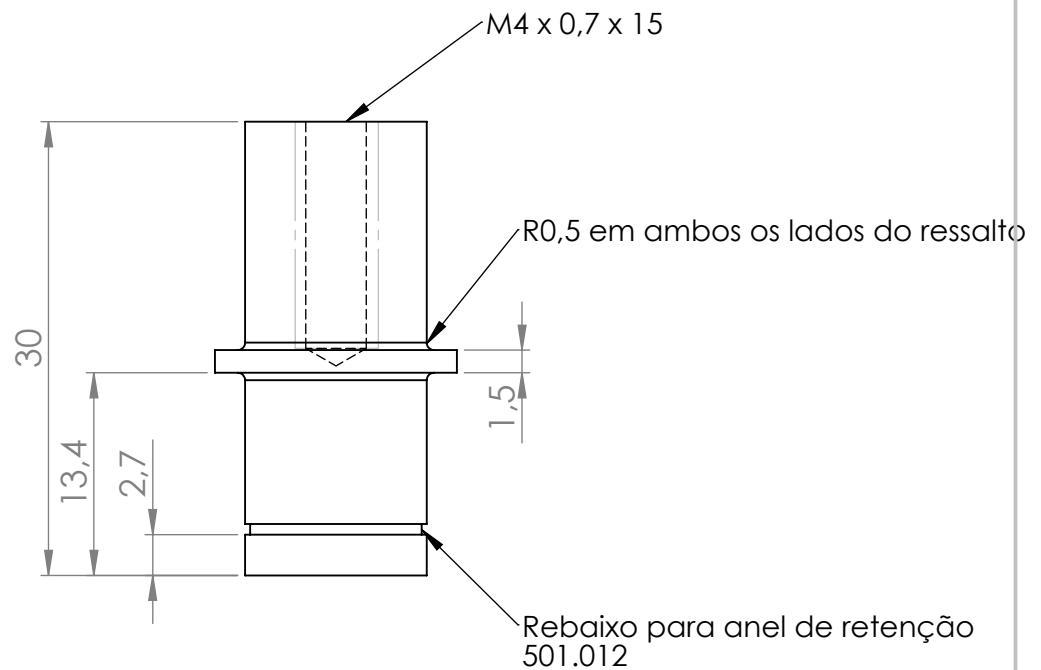
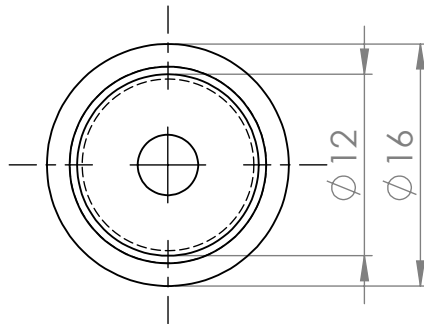
Universidade Federal do Rio de Janeiro		Deptº. de Engenharia Mecânica	
Disciplina Projeto de Graduação		Orientador Fernando A. N. Castro Pinto	
Diedro 	Desenhista Allan Bruno Souza Melo		DRE 108040144
Unidades mm	Tolerância geral $\pm 0,1$ mm	Peça Conector U eixo-espelho	
Escala 2:1	Data 09/08/2013	Qtd 04	Ref EE3 Material Acrílico

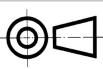


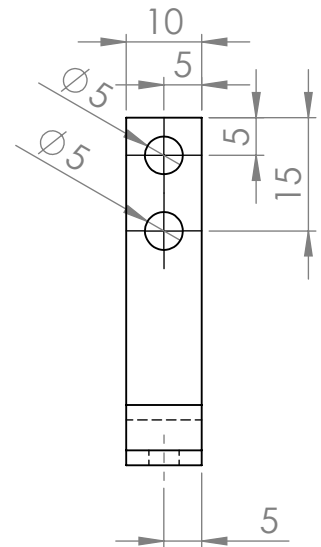
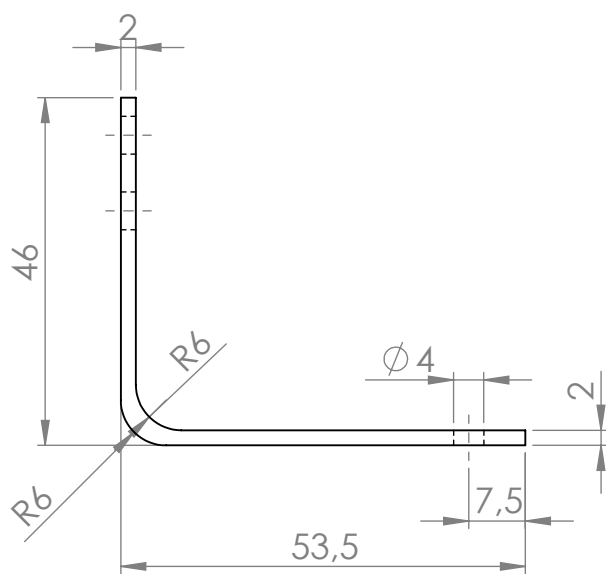
Universidade Federal do Rio de Janeiro		Deptº. de Engenharia Mecânica	
Disciplina Projeto de Graduação		Orientador Fernando A. N. Castro Pinto	
Diedro 	Desenhista Allan Bruno Souza Melo		DRE 108040144
Unidades mm	Tolerância geral $\pm 0,1$ mm	Peça Junta rotacional	
Escala 5:1	Data 09/08/2013	Qtd 02	Ref EE4 Material Alumínio

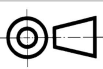


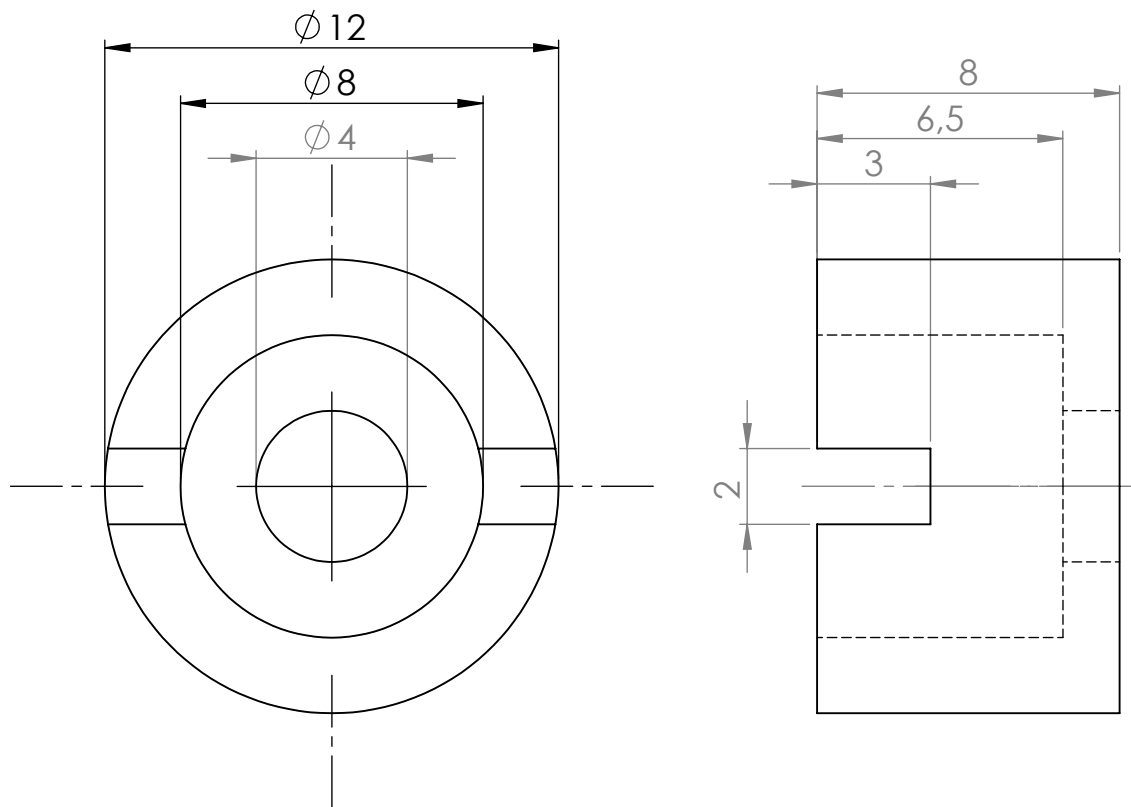
Universidade Federal do Rio de Janeiro		Deptº. de Engenharia Mecânica	
Disciplina Projeto de Graduação		Orientador Fernando A. N. Castro Pinto	
Diedro	Desenhista Allan Bruno Souza Melo		DRE 108040144
Unidades mm	Tolerância geral $\pm 0,1$ mm	Peça Eixo espelho-servo	
Escala 2:1	Data 09/08/2013	Qtd 02	Ref EE5 Material Alumínio

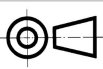


Universidade Federal do Rio de Janeiro		Deptº. de Engenharia Mecânica	
Disciplina Projeto de Graduação		Orientador Fernando A. N. Castro Pinto	
Diedro 	Desenhista Allan Bruno Souza Melo		DRE 108040144
Unidades mm	Tolerância geral $\pm 0,1$ mm	Peça Eixo espelho-parede	
Escala 2:1	Data 09/08/2013	Qtd 02	Ref EE6 Material Alumínio



Universidade Federal do Rio de Janeiro		Dept°. de Engenharia Mecânica	
Disciplina Projeto de Graduação		Orientador Fernando A. N. Castro Pinto	
Diedro 	Desenhista Allan Bruno Souza Melo		DRE 108040144
Unidades mm	Tolerância geral $\pm 0,1$ mm	Peça Suporte servo-motor	
Escala 1:1	Data 09/08/2013	Qtd 04	Ref ES3 Material Alumínio



Universidade Federal do Rio de Janeiro		Deptº. de Engenharia Mecânica	
Disciplina Projeto de Graduação		Orientador Fernando A. N. Castro Pinto	
Diedro 	Desenhista Allan Bruno Souza Melo		DRE 108040144
Unidades mm	Tolerância geral $\pm 0,1$ mm	Peça Encaixe servo-junta	
Escala 5:1	Data 09/08/2013	Qtd 02	Ref EE7 Material Alumínio