



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS PARNAÍBA
CURSO LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA

RAFAEL MAGALHÃES DOS SANTOS

ESTUDO E APLICAÇÕES DO FENÔMENO DE INTERFERÊNCIA DA LUZ
UTILIZANDO O INTERFERÔMETRO DE MICHELSON

PARNAÍBA

2019

RAFAEL MAGALHÃES DOS SANTOS

ESTUDO E APLICAÇÕES DO FENÔMENO DE INTERFERÊNCIA DA LUZ
UTILIZANDO O INTERFERÔMETRO DE MICHELSON

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Licenciatura Plena em
Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Piauí - Campus Parnaíba.

Orientador: Prof. Me. Bruno Pires Sombra.

PARNAÍBA

2019

Página reservada para ficha catalográfica que deve ser confeccionada após
apresentação e alterações sugeridas pela banca examinadora.

Para confeccionar a ficha catalográfica, acesse o Link: [http://libra.ifpi.edu.br/area-do-
estudante/biblioteca/ficha-catalografica](http://libra.ifpi.edu.br/area-do-estudante/biblioteca/ficha-catalografica)

RAFAEL MAGALHÃES DOS SANTOS

ESTUDO E APLICAÇÕES DO FENÔMENO DE INTERFERÊNCIA DA LUZ
UTILIZANDO O INTERFERÔMENTRO DE MICHELSON

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Licenciatura Plena em
Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Piauí. Campus Parnaíba.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Bruno Pires Sobra (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Deymes Silva de Aguiar
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Thiago Rocha Cunha
Professor SEDUC-PI

Esta monografia é dedicada aos meus pais, pelo apoio incondicional em todos os momentos difíceis da minha trajetória acadêmica. Sem eles nada seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores e servidores do IFPI do Campus Parnaíba, pois todos foram de fundamental importância para o meu crescimento acadêmico.

Ao meu orientador e amigo professor Bruno Pires Sobra, pela oportunidade de ser seu orientando neste trabalho de pesquisa de grandes proporções, e por todo apoio motivacional. Pois sem ele a caminhada até a conclusão do curso seria ainda mais árdua.

A minha gentil e querida namorada Marcyelle Araújo, que em todos esses anos de relacionamento que transcorreram paralelo ao curso de física, você se fez presente, paciente e compreensiva.

A todos os amigos que tive a oportunidade de fazer por intermédio do curso, sou eternamente grato, pois de forma direta ou indireta contribuíram para a minha formação acadêmica e humana.

Ao Iromar, torneiro mecânico responsável pela fabricação das peças, e ao meu primo Jhames Myron pelo desenho técnico das peças após a fabricação.

“I have a dream”.

Martin Luther King Jr.

RESUMO

A importância da experimentação dentro dos cursos de licenciatura em física é a motivação para a elaboração do presente trabalho, tendo em vista que a prática é importante no processo de ensino e aprendizagem dentro desse tipo de curso. É comum observar que muitos alunos tiveram contato com a disciplina de física, mas por vários motivos acabaram não tendo a oportunidade de construir as atividades experimentais, além das propostas nos catálogos dos laboratórios didáticos. Em meio a tudo isso, o objetivo central desse trabalho é colocar o aluno de licenciatura em física na rotina de um laboratório, com a finalidade de realizar uma investigação científica através de uma experimentação refinada, finalizando com a confecção, montagem e alinhamento de um interferômetro de Michelson. Para a execução desse projeto utilizou-se como base outro trabalho na mesma área, onde o experimento já estava dimensionado. Após as peças dispostas na base foi possível executar os testes de alinhamento e calibração para em seguida obter o padrão de interferência desejado.

Palavras-chave: Ensino de física. Interferômetro. Michelson-Morley

ABSTRACT

The importance of experimentation within the degree courses in physics is the motivation for the elaboration of the present work, considering that practice is important in the teaching and learning process within this type of course. It is common to note that many students had contact with the discipline of physics, but for various reasons ended up not having the opportunity to build the experimental activities, in addition to the proposals in the catalogs of the didactic laboratories. In the midst of all this, the main objective of this work is to place the graduate student in physics in the routine of a laboratory, with the purpose of carrying out a scientific investigation through a refined experimentation, ending with the making, assembly and alignment of an interferometer Michelson. For the execution of this project, another work in the same area was used as the basis, where the experiment was already dimensioned. After the parts placed on the base, it was possible to carry out the alignment and calibration tests to subsequently obtain the desired interference pattern.

Keywords: Physics teaching. Interferometer. Michelson-Morley

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Telescópio de Galileu Galilei.....	17
Figura 2	Onda unidimensional.....	22
Figura 3	Ondas senoidais.....	25
Figura 4	Princípio de Huygens.....	27
Figura 5	Representação do experimento de Young.....	28
Figura 6	Interferômetro de Michelson-Morley.....	31
Figura 7	Esquema do Interferômetro de Michelson-Morley.....	33
Figura 8	Suporte da fonte de luz laser.....	34
Figura 9	Suporte do espelho divisor de feixes.....	35
Figura 10	Suporte do espelho fixo.....	35
Figura 11	Suporte do espelho móvel.....	36
Figura 12	Suporte e caneta laser.....	37
Figura 13	Suporte e espelho semi-refletor (divisor de feixes)	37
Figura 14	Posicionamento das peças sobre a base.....	39
Figura 15	Incidência da luz laser no espelho semi-refletor.....	40
Figura 16	Padrão de interferência projetado no anteparo.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação das peças e suas respectivas quantidades.....	34
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

mm Milímetro

μm Micrometro

m Metro

cm Centímetro

km Quilômetros

h Hora

IFPI Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí

MDF *Medium Density Fiberboard*

LISTA DE SÍMBOLOS

$\leq$ Menor igual

∂ Derron

® Marca registrada

Δ Delta

∇ Nabla

θ Teta

ε Epsilon

δ Delta minúsculo

π Pi

μ Mi

ω Ômega

λ Lambda

% Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	HISTÓRICO SOBRE O ESTUDO DA LUZ.....	16
2.2	ONDAS ELETROMAGNÉTICAS.....	22
2.3	FENÔMENOS ONDULATÓRIOS.....	27
2.3.1	A interferência da luz.....	27
2.4	EXPERIMENTO DE YOUNG.....	28
2.5	INTERFERÔMETROS.....	30
2.5.1	Interferômetro de Michelson e Morley.....	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1	DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	33
3.2	MONTAGEM.....	37
3.3	ALINHAMENTO.....	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
5	CONCLUSÃO/ CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
	REFERÊNCIAS	45
	ANEXO A – DESENHO DAS PEÇAS E SUAS MEDIDAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

É inegável a importância da experimentação no ensino de ciências. Diversos estudos apontam essa prática como parte integrante de metodologias que permitem ao discente observar e questionar o que é estudado em sala de aula, facilitando sua compreensão. Entretanto, o cotidiano escolar apresenta uma situação em que este tipo de recurso é pouco utilizado, e fatores como a falta de estrutura e capacitação do educador podem estar associados a este problema (Pacheco, 1997; Galianzi et al., 2001).

O ensino de física, nos diferentes níveis, desenvolve no estudante um conjunto de capacidades cognitivas que servirão para o desenvolvimento social, profissional, acadêmico e pessoal. Segundo os Parâmetros Curriculares Nacionais, “O conhecimento de física na escola média trata de construir uma visão da física voltada para a formação de um cidadão contemporâneo, atuante e solidário, com instrumentos para compreender, intervir e participar na realidade” (1999, p.59). Mas há um problema: a física utiliza linguagem matemática para expressar seus conceitos e isso cria uma aversão a matéria. A questão é: como preparar o futuro educador para lecionar física, de forma atraente, sem abandonar o conhecimento padrão?

Devido ao caráter experimental que a física possui, muito se tem investido em metodologias que integrem práticas experimentais à atividade docente em sala de aula. Segundo Pacheco (1997), a experimentação é parte integrante do processo de ensino-aprendizagem de ciências, e deve dar ao aluno a oportunidade de expressar suas concepções de forma direta, experimental, ou de forma indireta, através de registros desses fenômenos. Entretanto, mesmo com este entendimento, o cotidiano da escola mostra que esse tipo de atividade é pouco frequente, seja por falta de estrutura, ou pela falta de experiência do educador em atividades deste tipo durante sua formação (Galianzi et al., 2001).

Segundo Galianzi et al. (2001), para mudar essa realidade é preciso ter clareza a respeito dos objetivos das atividades experimentais, sobre a natureza da ciência, sobre o papel do cientista e do método científico, superando reducionismos e deformações presentes nas concepções de professores em exercício e em formação.

Diante de tal fato, é imprescindível aos docentes em exercício, ou em formação, o conhecimento acerca do fenômeno estudado, bem como do tipo de experimento que

o melhor representante. O conhecimento do manejo dos equipamentos em laboratório é outro fator a ser considerado. Desse modo esta monografia visa capacitar o aluno de licenciatura neste tipo de prática, inserindo-o no cotidiano de um laboratório de física, através da investigação de um fenômeno físico considerado.

Dentre as áreas do conhecimento pertencentes a física, escolheu-se a óptica para o desenvolvimento deste trabalho e o fenômeno a ser reproduzido foi a interferência da luz. Este fenômeno consiste na sobreposição de ondas luminosas coerentes sobre um anteparo. A intensidade luminosa observada depende da diferença de fase (diferença de caminho óptico) que a luz proveniente de pontos distintos, apresenta em um determinado ponto do anteparo.

A obtenção deste fenômeno foi possível através da construção de um interferômetro de Michelson. Este tipo de interferômetro utiliza um filme semi-refletor e espelhos fixos, e de posição regulável, para a divisão do feixe luminoso. Após incidir sobre o filme semi-refletor, parte do feixe luminoso é transmitida para o anteparo e parte é direcionada para um espelho fixo, a porção refletida pelo espelho fixo é então direcionada para o anteparo onde o fenômeno pode ser observado. Este equipamento é utilizado na análise de materiais em função de seus espectros de emissão ou radiação, verificando a estrutura fina e hiperfina das linhas espectrais, que possuem uma disposição específica, característica para cada elemento.

Desse modo, o objetivo geral deste trabalho é inserir o aluno de licenciatura em física na rotina de um laboratório com a finalidade de realizar uma investigação científica através de uma experimentação refinada, de modo a capacitá-lo no manejo de equipamentos finalizando com a confecção, montagem e alinhamento de um interferômetro de Michelson.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. HISTÓRICO SOBRE O ESTUDO DA LUZ

Segundo Sérgio Carlos Zílio (2009), “a óptica é o ramo da física que estuda a propagação da luz e sua interação com a matéria”. Com o avanço tecnológico, o estudo da ótica vem revolucionando o modo como compreendemos a natureza. Um marco dessa área de estudo foi a criação do laser na década de 1960, o que ocasionou uma evolução considerável em setores da indústria e saúde. Apesar do grande avanço tecnológico obtido recentemente, alguns dos principais estudos e aplicações relacionados à óptica datam do século XVI, um período de importantes descobertas.

O astrônomo Galileu Galilei, nascido em 15 de fevereiro de 1564, em Pisa na Itália, teve grandes contribuições neste período. Além de suas inúmeras contribuições no ramo da ótica, ele também escreveu sobre alavancas, roldanas, parafusos, arquitetura militar e construiu vários instrumentos. Suas invenções mais notáveis, incluem a máquina para elevar água, uma bússola geométrica e um termômetro de ar. Neste momento nota-se uma inclinação de Galileu para o que hoje se conhece como física experimental (PIRES, 2011).

E vale ressaltar que Galileu não inventou o telescópio de lentes simples e nunca afirmou tê-lo feito. Entre 1600 e 1610, Galileu pesquisou sobre a queda dos corpos, o movimento de projéteis, as leis do pêndulo, mas nada publicou. No mesmo período surgiram os primeiros sistemas ópticos, que consistiam basicamente na combinação de lentes. Em 1608, um fabricante de óculos holandês Hans Lippershey (1587-1619) pediu uma licença para a fabricação de telescópios de lentes simples e duplas, chegando mesmo a vender vários desses instrumentos (o aparelho foi chamado originalmente de *perspicillum*, a palavra telescópio foi criada em 1611) (PIRES, 2011).

Apesar de não ter sido o inventor do telescópio, Galileu construiu instrumentos de qualidade superior aos já existentes e de maior poder de aumento. Ele transformou o telescópio em um poderoso instrumento de pesquisa e foi o primeiro a publicar uma descrição do universo visto através dele. Deve-se notar que o telescópio foi o primeiro sistema óptico a ser usado no estudo da natureza (PIRES, 2011).

Com base em seus estudos relacionados a luz, ele foi capaz de construir em 1609 o seu primeiro telescópio, com o qual fez várias demonstrações e ampliava a

área dos objetos por um fator da ordem de 1000, reduzindo sua distância aparente por um fator da ordem de 30. Com sua nova invenção em mãos, Galileu fez muitas descobertas na área da astronomia que entraram para a história. Esse instrumento é clássico no ramo da óptica e sua configuração, a ocular côncava, leva o nome de seu inventor até os dias atuais, telescópio Galileano (NUSSENZVEIG, 2014).

Figura 1 – Telescópio de Galileu Galilei



Fonte: VENTURA Dalia (2019).

Na sua primeira publicação científica, o *Sidereus Nuncius* (O mensageiro das estrelas) publicado em 1610, Galileu descreveu os resultados de suas observações astronômicas. Estas foram de fundamental importância para a sustentação do sistema heliocêntrico. Imediatamente depois de descrever a construção e uso do Telescópio, ele passou a relatar os resultados das suas observações. Quando examinou a lua observou muitas manchas, e algumas delas mais escuras e maiores do que outras, e várias manchas menores. Interpretou esses dados escrevendo que a superfície lunar não era suave e uniforme, mas irregular, cheia de cavidades e protuberâncias. Ele não só escreveu a aparência das Montanhas da Lua, mas chegou a estimar suas alturas (NUSSENZVEIG, 2013).

Observou que as estrelas fixas não pareciam aumentar de tamanho quando vistas pelo telescópio, concluiu assim, que elas estavam há uma enorme distância da Terra. No entanto, a quantidade delas era muito maior. Ele mesmo descobriu mais de 500 estrelas nunca vistas antes. Observou que a Via Láctea e as nebulosas eram formadas por um número grande de estrelas. Descobriu também os quatro satélites de Júpiter, sendo esta a sua descoberta mais importante (NUSSENZVEIG, 2013).

Três outras descobertas astronômicas feitas por Galileu mais tarde foram: que Vênus tinha fases como a lua (essa descoberta foi feita independentemente pelos Jesuítas do colégio de Roma), que Saturno tinha um par de “orelhas” (os anéis) que mudavam de forma e algumas vezes desapareciam, e as manchas solares (que já tinham sido observadas antes). Escreveu que as manchas provavam que o sol não era um corpo perfeito, mas que girava em torno do seu eixo (PIRES, 2011).

Seguindo com o avanço dos telescópios pode-se relatar o telescópio de Johannes Kepler (1571-1630), utilizado para fazer observações astronômicas, assim fundamentando as leis de Kepler. A principal vantagem desse telescópio era a de possibilitar maior tolerância na acomodação visual. Outro sistema óptico que combina duas lentes é o microscópio, sua invenção ocorreu praticamente ao mesmo tempo que a do telescópio. Seu inventor foi o holandês Zacharias Janssen (1588-1632) por volta de 1609 (PIRES, 2008; ZILIO, 2009).

O desenvolvimento da instrumentação óptica nesse período, aliado ao desenvolvimento matemático permitiu a análise da propagação dos raios luminosos em meios materiais. Kepler demonstrou em seu livro *Dioptrice*, de 1611, a lei da refração para ângulos pequenos, assim estabelecendo que ângulos de incidência e refração são proporcionais. Tal aproximação, atualmente conhecida como aproximação paraxial, foi fundamental para a compreensão de sistemas ópticos simples, compostos de lentes delgadas. Ele também idealizou o conceito de reflexão total interna, descrito na mesma obra (PIRES, 2008).

As contribuições de Kepler foram muito relevantes para o contexto da época, mas a formulação matemática que melhor desenvolveu a óptica veio dos trabalhos de Willebrord Snell (1591-1626), introduzindo em 1621 a lei da refração ou também conhecida como lei dos cossenos. Nesse novo olhar surge a óptica aplicada moderna, tendo como principal característica o cálculo de sistemas mais complexos. Sistemas estes que não poderiam ser calculados pela aproximação paraxial de Kepler (ZILIO, 2009).

Tempos mais tarde, o filósofo, matemático e físico francês René Descartes (1596-1650) considerado por alguns como o pai da filosofia moderna, por dar ênfase ao método dedutivo; Em seus estudos sobre óptica, deduziu a Lei de Snell-Descartes, no ano de 1637, abandonando a formulação matemática que se baseava em ondas de pressão num meio elástico. Ao que se sabe, este foi o momento inaugural do

tratamento da luz como onda (PIRES, 2008; ZILIO, 2009).

Descarte foi o primeiro a postular que o éter tinha propriedades mecânicas, e que suas partículas estavam continuamente em movimento. Rejeitando a possibilidade de ação a distância, explicava o movimento circular dos corpos celestes em termos de vórtices, dizendo que existiam imensos redemoinhos circulares no fluido que enchia o espaço, que arrastavam os planetas e os satélites em suas órbitas. Nosso sol estava no centro de um desses vórtices e os planetas eram arrastados em torno dele (PIRES, 2011).

Nesse contexto histórico se faz necessário essa pausa na evolução da óptica para analisar o éter proposto por Descartes e suas características. Entender a importância desse meio onde os planetas estavam imersos é o motivo da construção do interferômetro de Michelson (assunto abordado em tópicos seguintes).

Retomando a evolução da óptica, outra forma de dedução da lei de Snell foi idealizada em 1657 por Pierre de Fermat (1601-1665), que embasava-se na ideia de raios de luz sendo propagados em linha reta que era sustentada por Heron, de Alexandria; este afirma que a menor distância entre dois pontos é uma reta. Mas existe também a possibilidade dos raios se propagarem em trajetórias curvas, esse fato só é possível se o meio de propagação não for homogêneo (ZILIO, 2009).

Um cientista que teve grandes trabalhos publicados nessa área foi Isaac Newton, que nasceu em Woolsthorpe na Inglaterra, em 25 de dezembro de 1642. Quando a peste bubônica, que assolava a Inglaterra, atingiu a universidade de Cambridge em 1665, a instituição foi fechada e Newton voltou a fazenda Lincolnshire, lá ele realizou experimentos de óptica, química e continuou a estudar matemática. Aparentemente começou seus estudos sobre a teoria das cores também em 1665 (PIRES, 2011).

Era de comum acordo entre os cientistas daquela época considerar a luz branca como simples e as cores como modificação dela. Newton afirmou que a luz branca é heterogênea e que raios de cores diferentes são retratadas em ângulos diferentes (PIRES, 2008). Com base em seus estudos sobre o comportamento da luz, no inverno de 1669, Newton construiu o primeiro telescópio de reflexão (diferente do telescópio de Galileu, que usava uma configuração com duas lentes, o telescópio de Newton era constituído por dois espelhos sendo um em formato parabólico e outro em

formato plano, projetado em um ângulo de 45° em relação ao espelho parabólico) a principal vantagem deste telescópio é que ele eliminava a aberração cromática produzida por uma lente e seu tubo era mais curto (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2017).

Em 1671, Newton foi eleito membro da Royal Society (a mais respeitada sociedade científica da época, localizada em Londres) pelos seus trabalhos em óptica, e no início de 1672, apresentou a essa sociedade um resumo de sua teoria sobre a Luz. Foi em uma carta para Robert Hooke (1635-1703) em 5 de fevereiro de 1676, referindo-se ao seu trabalho em ótica, disse: "Se vi mais longe foi porque me apoiei em ombros de Gigantes". Seus artigos em ótica comunicados entre 1672 e 1676 foram coletados e organizados em sua obra *Optics* (Ótica) que só foi publicado em 1704. Neste livro, entre outras coisas, apresenta sua descoberta da decomposição da luz branca (PIRES, 2011).

No século XVII surgiu uma disputa entre duas teorias rivais sobre a natureza da Luz: a teoria corpuscular e a teoria ondulatória. Newton acreditava que o raio de luz era constituído de minúsculas partículas materiais emitidas pela fonte luminosa. Um dos argumentos que ele usou para defender essa ideia foi que a luz se propaga em linha reta e reflete no espelho como uma bola na parede. Outro argumento era que a luz, diferente do som, não dobra esquinas (PIRES, 2011).

No entanto, a teoria corpuscular não é a ideia principal da Ótica de Newton. A esse respeito ele disse: "a partir de minha teoria defendendo a corporeidade da Luz; mas eu faço sem nenhuma positividade absoluta". Ao sugerir que a luz era composta de partículas, ele havia cuidadosamente usado a palavra talvez. Essa era, continuou, "quando muito, uma consequência muito possível da doutrina, e não uma suposição fundamental". Ele teve o cuidado de não se comprometer em definitivo com uma teoria sobre a natureza física da Luz (PIRES, 2011).

A teoria ondulatória da luz proposta pelo físico, filósofo, matemático e astrônomo holandês Christiann Huygens (1629-1695) também data do século XVII, entretanto, os primeiros experimentos que comprovariam tal teoria somente seriam realizados no início do século XIX através do brilhante trabalho de Thomas Young (1773-1829) (NUSSENZVEIG, 2014).

Huygens afirmou que as explicações mecânicas eram essenciais em ciências,

um fato que teve influência importante na sua interpretação matemática da natureza da Luz. Sua teoria propunha que o movimento ondulatório acontecia em um meio universal, sem massa e que enchia todo o espaço. Esse meio foi mais tarde chamado de éter luminífero (PIRES, 2011).

Para Huygens, a luz era uma onda se propagando no éter. Sua teoria só passou a ser aceita a partir de 1800 quando o físico inglês Thomas Young mostrou experimentalmente que a luz sofria o fenômeno de interferência (PIRES, 2011).

Para observar este fenômeno, Young utilizou uma sala escura, onde permitiu que a luz solar passasse por dois furos pontuais distantes 1 *cm* um do outro. Em uma tela localizada a um metro de distância dos furos ele observou regiões alternadas de claro e escuro, cada região ocupando uma largura aproximada de 0,6 *mm*. O trabalho de Young forneceu um forte apoio a teoria ondulatória da Luz (PIRES, 2011).

Porém, em 1809, foi observado o fenômeno de polarização, descoberto antes por Erasmus Bartholin, por volta de 1669, e inexplicável na época para as duas teorias (corpuscular e ondulatória). Quando Dominique Arago (1786-1853) mostrou que dois feixes de luz, polarizados em planos perpendiculares um ao outro, não se interferem, Young ficou preocupado em relação a teoria ondulatória (PIRES, 2011).

Em 1817, ele (que até então considerava as ondas luminosas como longitudinais, fazendo uma analogia com o som) admitiu que alguma forma de vibração transversal se fazia necessária para explicar a polarização. Ele tentou derivar essa vibração a partir de vibrações longitudinais que ele considerou como primárias (PIRES, 2011).

Em 1826, Augustin Fresnel (1789-1827), a partir de trabalhos desenvolvidos em colaboração com Arago, concluiu que as ondas luminosas eram transversais e a polarização passou a ser explicada em termos da teoria ondulatória. Em consequência, o éter luminífero deveria atuar como um sólido elástico, pois ondas transversais não se propagam em um líquido ou em um gás (ZILIO, 2009).

Mas, para transmitir ondas na faixa dos comprimentos de ondas associadas a luz e à velocidade da luz, o meio deveria ter uma rigidez muito maior do que a do aço; por outro lado, deveria ser transparente para permitir que os planetas e as estrelas se movessem através dele como se não existisse (ZILIO, 2009).

Em 1760 Leonard Euler, que favorecia a teoria ondulatória, argumentando que

os corpos não perdem qualquer massa mensurável quando emitem luz, sugeriu que o mesmo éter onde a luz se propaga era o responsável pelos fenômenos elétricos e gravitacionais (ZILIO, 2009).

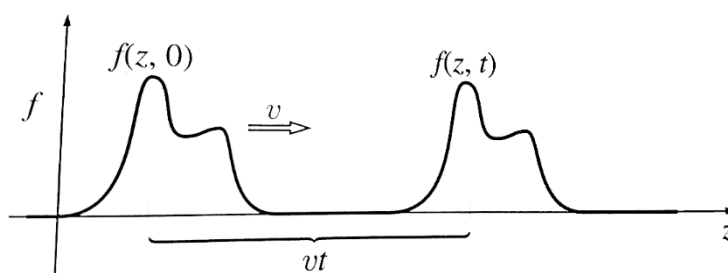
2.2. ONDAS ELETROMAGNÉTICAS EM UMA DIMENSÃO

Admitindo a natureza ondulatória da luz, inicia-se o estudo das equações que consolidaram essa nova forma de interpretação da luz. Para que isso seja possível deve-se inicialmente conceituar o que vem a ser uma onda, segundo David J. Griffiths

“Uma onda é um distúrbio de um meio contínuo que se propaga com uma forma fixa e com velocidade constante. [...] na presença de absorção, a onda diminui de tamanho à medida que se move; se o meio for dispersivo, frequências diferentes viajarão a velocidades diferentes; em duas ou três dimensões, à medida que a onda se espalha, sua amplitude diminui; é claro que ondas estacionárias não se propagam de forma alguma” (GRIFFITHS, 2011).

Após estabelecido o conceito de onda, é conveniente representar matematicamente essa onda. Iniciando essa análise partindo de uma abordagem simples e intuitiva, representando o comportamento de uma onda monocromática em uma corda, na Figura 2 é possível visualizar uma onda unidimensional se deslocando da esquerda para a direita na direção do eixo z .

Figura 2 – Onda unidimensional



Fonte: GRIFFITHS (2011).

A Figura 2 ilustra a mesma onda em dois momentos distintos, o primeiro sendo em $t = 0$, e posteriormente em t . Podemos observar que cada ponto que compõem a onda move-se para a direita com uma velocidade vt (onde v é a velocidade e t o

tempo de propagação). Admitindo que essa perturbação foi gerada em uma corda esticada podemos escrever da seguinte forma: $f(z, t)$ representando o deslocamento no ponto z , no tempo posterior t . Dada a forma inicial da corda, $g(z) = f(z, 0)$, qual será a forma subsequente, $f(z, t)$?

$$f(z, t) = f(z - vt, 0) = g(z - vt) \quad (1).$$

Essa expressão captura, de forma matemática, a essência do movimento da onda. Ela diz que a função $f(z, t)$, que poderia depender de z e t de uma forma qualquer que fosse, de fato depende somente de uma combinação muito especial de $z - vt$. Sendo verdade, a função $f(z, t)$ representa uma onda de forma fixa que viaja na direção z com velocidade v . Isto possibilita escrever a forma da onda em uma expressão mais genérica (GRIFFITHS, 2011).

Tendo em vista que para a maioria dos casos estudados em física se faz necessária uma expressão mais geral; imagine uma corda muito longa, com tensão T , se ela for deslocada do estado de equilíbrio, a força transversal líquida no segmento entre $z + \Delta z$ será

$$\Delta F = T \sin \theta' - T \sin \theta \quad (2).$$

Admitindo que a distorção da corda é pequena, os ângulos são pequenos, logo podemos substituir a função seno pela tangente.

$$\Delta F = T(\sin \theta' - \sin \theta) \quad (3).$$

$$\Delta F = T(\tan \theta' - \tan \theta) \quad (4).$$

$$\Delta F = T \left(\left| \frac{\partial f}{\partial z} \right|_{z+\Delta z} - \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right|_z \right) \quad (5).$$

$$\Delta F = T \left(\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \Delta z \right) \quad (6).$$

Se a massa por unidade de comprimento é μ , a segunda lei de Newton diz que.

$$\Delta F = \mu(\Delta z) \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \quad (7).$$

Igualando (2.2.6) e (2.2.7), temos.

$$T \left(\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \Delta z \right) = \mu(\Delta z) \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \quad (8).$$

$$T \left(\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \right) = \mu \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \quad (9).$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{\mu}{T} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \quad (10).$$

Fazendo $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \Rightarrow v^2 = \frac{T}{\mu}$, sendo v a propagação de onda. A equação fica da seguinte forma,

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \quad (11).$$

Assim, chegamos na equação da onda para pequenas vibrações na corda.

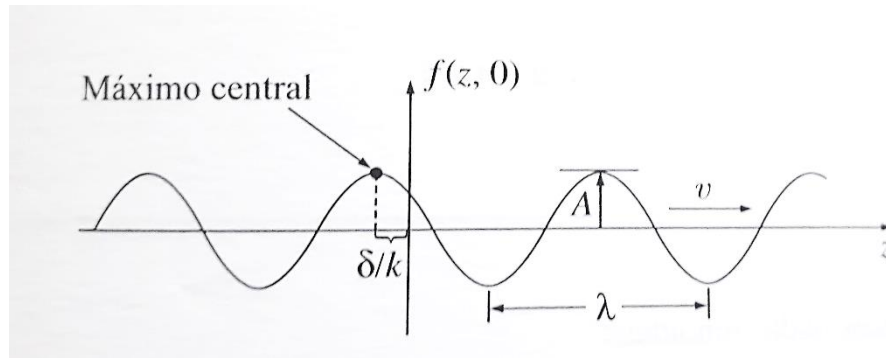
$$f(z, t) = h(z - vt) \quad (12).$$

Onde $f(z, t)$ é uma função arbitrária que define o perfil de uma onda que se propaga para a direita.

$$f(z, t) = A \cos[k(z - vt) + \delta] \quad (13).$$

De todas as formas possíveis de ondas, a senoidal descrita acima é a mais conhecida.

Figura 3 – Ondas senoidais



Fonte: GRIFFITHS (2011).

Sendo A a amplitude, a fase da onda representada por $k(z - vt) + \delta$ onde k é o número de onda e por fim δ é a constante de fase. (Podendo somar qualquer múltiplo de 2π sem alterar $f(z, t)$, assim $(0 \leq \delta \leq 2\pi)$).

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (14).$$

Quando z avança $\frac{2\pi}{k}$, o cosseno executa um ciclo completo.

$$T = \frac{2\pi}{kv} \quad (15).$$

A expressão acima representa o período. A frequência ν (número de oscilações por unidade de tempo) é

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{kv}{2\pi} = \frac{v}{\lambda} \quad (16).$$

Onde,

$$\omega = 2\pi\nu = kv \quad (17).$$

Normalmente, é mais elegante escrever as ondas senoidais. Em termos de, do que

$$f(z, t) = A \cos[kz + \omega t - \delta] \quad (18).$$

Ou

$$f(z, t) = A \cos[-kz - \omega t + \delta] \quad (19).$$

As ondas eletromagnéticas no vácuo são representadas por equação de onda para os campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$. Em região do espaço onde não há carga ou corrente, as equações de Maxwell dizem que.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (20).$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (21).$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (22).$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (23).$$

No vácuo, então, cada componente de $\vec{E}$ e $\vec{B}$ satisfazem a equação da onda tridimensional.

$$\nabla^2 f = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \quad (24).$$

Portanto, as equações de Maxwell sugerem que o espaço vazio comporta a propagação de ondas eletromagnéticas viajando a uma velocidade v .

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (25).$$

O que é precisamente a velocidade da luz. As equações de Maxwell são a base da teoria ondulatória da luz.

2.3. FENÔMENOS ONDULATÓRIOS

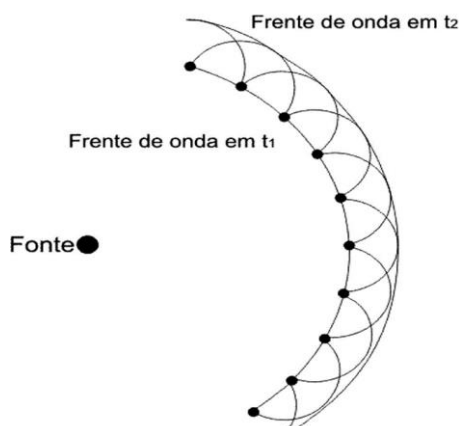
2.3.1. A INTERFERÊNCIA DA LUZ

Na natureza, podemos encontrar várias formas de manifestações dos fenômenos de interferência da luz. Uma delas é o padrão de cores das asas da borboleta *Morpho*. Na parte inferior da asa é predominante a ocorrência da cor marrom e na parte superior a cor azul, podendo variar em vários tons de azul conforme o ângulo de visualização do observador. Isso ocorre devido às múltiplas reflexões e transmissões da luz nas asas do animal. Os raios luminosos refletidos (transmitidos), que percorrem caminhos ópticos diferentes, interferem entre si alterando a percepção da cor em função do ângulo de incidência da luz (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Como mencionado anteriormente, a interferência é um fenômeno ondulatório, e um dos primeiros físicos a propor uma teoria consistente sobre o comportamento ondulatório da luz foi o holandês Christian Huygens, em 1678. A grande vantagem de sua teoria era explicar a refração e a reflexão em termos de ondas (ou frentes de ondas) e atribuir um significado físico ao índice de refração (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009). Esta teoria ficou conhecida como Princípio de Huygens, e propôs que:

“Todos os pontos de uma frente de onda se comportam como fontes pontuais de ondas secundárias. Depois de um intervalo de tempo t , a nova posição da frente de onda é dada por uma superfície tangente a essas ondas secundárias” (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Figura 4 – Princípio de Huygens



Fonte: "Princípio de Huygens" em *Só Física*. Virtuoso Tecnologia da Informação, 2008-2019.

Consultado em 17/12/2019 às 08:17. Disponível na Internet

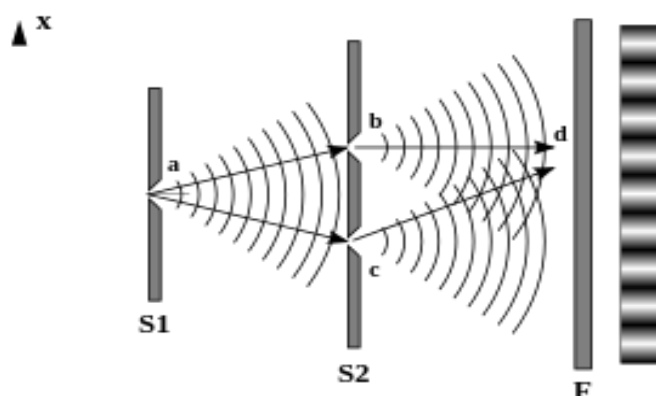
em <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Ondas/principiodehuygens.php>.

Entretanto, a comprovação experimental do caráter ondulatório da luz viria através do experimento de fenda dupla proposto por Thomas Young, em 1801, no qual se observou um padrão de interferência bem definido para a luz, o que permitiu concluir que o fenômeno ocorria de maneira semelhante à interferência de ondas mecânicas na superfície da água (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

2.4. EXPERIMENTO DE YOUNG

Uma descrição simples do experimento de Young é mostrada na figura 5. Uma fonte de luz monocromática incide sobre o anteparo S1, onde passa por uma fenda e sofre difração na forma de onda esférica, em seguida passa pelo anteparo S2, onde existem duas fendas da ordem do comprimento de onda da luz incidente e que estão separadas por uma distância d , sofrendo outra difração, onde as ondas têm formato esférico e propagam-se simultaneamente no espaço até atingir um anteparo capaz de captar esses padrões de interferência, caracterizados por pontos claros, quando a interferência é construtiva, e pontos escuros, quando a interferência é destrutiva. Esse padrão de franjas claras e escuras é chamado de padrão de interferência (NUSSENZVEIG, 2014).

Figura 5 – Representação do experimento de Young



Fonte: " Ilustração da Experiência de Young " em Wikiwand. Consultado em 17/12/2019 às 08:17.

Disponível na Internet em <https://www.wikiwand.com/pt/Interfer%C3%Aancia>.

Para a descrição matemática do fenômeno da interferência consideremos a luz representada pela função de onda escalar $E(\vec{x}, t)$ onde $v(\vec{x})$ é uma função (complexa) relacionada ao seu formato. No caso do experimento de Young $v(\vec{x})$

representa uma onda esférica.

$$E(\vec{x}, t) = \text{Re}[v(\vec{x})e^{-i\omega t}] \quad (26).$$

$$E(\vec{x}, t) = \frac{A}{r} \cos [k\vec{x} - \omega t + \delta] \quad (27).$$

A intensidade média $I(\vec{x})$ da onda luminosa é proporcional ao quadrado da função complexa $v(\vec{x})$:

$$I(\vec{x}) = |v(\vec{x})|^2 \quad (28).$$

Para a intensidade resultante de duas fontes, temos:

$$I(\vec{x}) = |v_1(\vec{x}) + v_2(\vec{x})|^2 \quad (29).$$

$$\text{onde } v_1(\vec{x}) = |v_1|e^{i\omega_1} \text{ e } v_2(\vec{x}) = |v_2|e^{i\omega_2}$$

Assim, obtemos:

$$I(\vec{x}) = |v|^2 = |v_1|^2 + |v_2|^2 + 2|v_1 v_2| \cos \varphi_2 - \varphi_1 \quad (30).$$

$$\text{Como } I_1 = |v_1|^2 \text{ e } I_2 = |v_2|^2 ,$$

$$I(\vec{x}) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta \quad (31).$$

Sendo $\Delta = \varphi_2 - \varphi_1$, é a diferença de fase entre as ondas que interferem. No experimento de Young para a luz monocromática temos $I_1 = I_2 = \frac{A^2}{R^2}$, e a equação (2.4.4) se torna:

$$I(\vec{x}) = 2I_1(1 + \cos \Delta) = 4I_1 \cos^2 \left(\frac{\Delta}{2} \right) \quad (32).$$

Assim, para $\Delta = 2n\pi$ a interferência é construtiva e $I(\vec{x}) = 4I_1$, já no caso de $\Delta = (2n + 1)\pi$, a interferência é destrutiva e $I(\vec{x}) = 0$.

2.5. INTERFERÔMETROS

Os interferômetros utilizam o princípio da interferência em lâminas delgadas, ou seja, a interferência devido à diferença de caminho ótico entre raios luminosos resultantes de diversas reflexões e/ou transmissões em determinado material, na análise de materiais em função de seus espectros de emissão ou radiação, analisando a estrutura fina e hiperfina das linhas espectrais. Desse modo a função do espectrômetro é separar os comprimentos de onda, definindo assim as linhas espectrais, que possuem uma disposição específica, característica para cada elemento (NUSSENZVEIG, 2014).

O que define a qualidade de um interferômetro é o seu poder separador, definido por $\lambda/(\delta\lambda)$, que seria o inverso da menor variação fracionária que ele permite determinar ou seja, o poder separador define a resolução do interferômetro, o quanto ele é preciso na separação de diferentes comprimentos de onda". (NUSSENZVEIG, 2014).

2.5.1. INTERFERÔMETRO DE MICHELSON E MORLEY

Em 1881, Albert Abraham Michelson (1852-1931) fez sua primeira medição precisa da velocidade da luz na *U. S. Naval Academy* (responsável por educar e formar oficiais da Marinha e dos Marines dos Estados Unidos), onde na época serviu como cadete. Michelson foi o primeiro cientista da época a propor que, embora o efeito do movimento da Terra sobre qualquer medida da velocidade da luz baseada em um percurso de “ida e volta”, fosse pequeno demais para ser medido diretamente, seria possível medir a razão $\frac{v^2}{c^2}$ por um processo indireto, usando a interferência de ondas luminosas como um “relógio” muito preciso (TIPLER; LLEWELLYN, 2017).

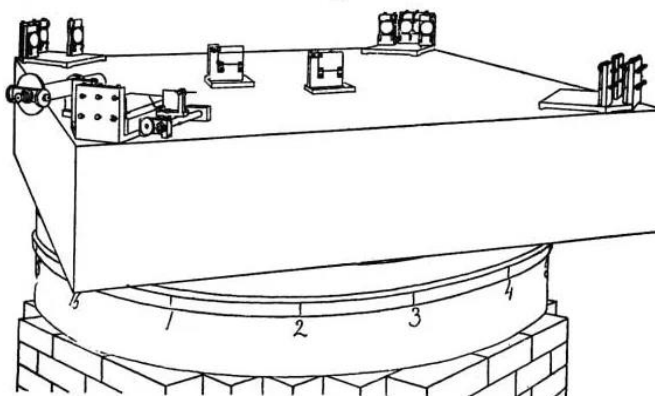
Para executar essa medida indireta, Michelson projetou um equipamento que posteriormente ficaria conhecido por “Interferômetro de Michelson”, o principal objetivo desse aparato era medir a velocidade da luz em relação ao interferômetro (ou seja, em relação à Terra), o que equivaleria a demonstrar que a Terra estava em movimento em relação ao éter, assim representando uma prova consistente da existência do éter luminífero (meio especial pelo qual a luz se propagava) (SILVA et al, 2017).

Michelson não encontrou qualquer evidência de um vento de éter. Analisando

o resultado negativo, ele concluiu que existia uma dificuldade na teoria que não era explicada de maneira satisfatória. Ele repetiu a experiência em 1887 com o auxílio de Edward William Morley (1838-1923) em Cleveland, Ohio, Estados Unidos. O novo experimento era maior que o antecessor e mais sofisticado, pois contava com reflexões múltiplas, que permitiu o aumento da distância entre os braços desse novo interferômetro, que passou a ser de 11 metros, assim aumentando muito a precisão do equipamento (TIPLER; LLEWELLYN, 2017).

A figura abaixo mostra a montagem e funcionamento do interferômetro construído por Michelson e Morley. A imagem vista pelo observador consistia em uma série de faixas claras e escuras, denominadas franjas de interferência. Ao analisar as franjas era de se esperar que o movimento da Terra em relação ao éter luminífero introduzisse uma diferença de tempo (de fase). Uma rotação de 90° do interferômetro multiplicaria por dois a diferença de tempo e mudaria a fase, fazendo com que o padrão de interferência se deslocasse de uma distância N , mudando a forma do padrão observado (TIPLER; LLEWELLYN, 2017).

Figura 6 – Interferômetro de Michelson-Morley



Fonte: (MICHELSON; MORLEY, 1887).

Por se tratar de um experimento de grandes proporções era montado em cima de um bloco de pedra, que flutuava em um banho de mercúrio. Isto facilitava a rotação do aparelho já que eram necessárias medidas em direções diferentes, por ser um líquido denso o mercúrio também ajudava a minimizar vibrações mecânicas que poderia resultar em uma variação de comprimento entre os braços do interferômetro e por sua vez afetando o padrão de franjas (TIPLER; LLEWELLYN, 2017).

Usando uma lâmpada de sódio com comprimento de onda de $\lambda = 590 \text{ nm}$ e

supondo que a velocidade seja $v = 30 \text{ km/h}$ (ou seja, uma velocidade da Terra em relação ao éter igual à velocidade orbital do planeta), os pesquisadores esperavam que o deslocamento N fosse 40% da largura de uma franja, ou seja, um valor de 40 vezes maior do que o deslocamento mínimo (1% da largura de uma franja) que o equipamento era capaz de medir (MICHELSON; MORLEY, 1887).

Após executar o experimento e analisar os resultados, os cientistas perceberam que o deslocamento previsto não foi observado. Em vez disso, as franjas se deslocaram de apenas 1% da largura de uma franja, um valor da mesma ordem que a precisão do instrumento. Michelson descreveu os resultados da seguinte forma:

“O deslocamento observado foi certamente menor que um vinte avos (de 40% de largura de uma franja) e provavelmente menor que um quarenta avos. Como, porém, o deslocamento é proporcional ao quadrado da velocidade, a velocidade relativa entre a Terra e o éter é provavelmente menor que um sexto de velocidade orbital da terra e certamente menor que um quarto” (MICHELSON; MORLEY, 1887).

Com essas palavras Michelson e Morley haviam acabado de mostrar que a velocidade da Terra em relação ao éter não podia ser maior que 5 km/h . Observou-se mais uma vez que um efeito nulo foi encontrado.

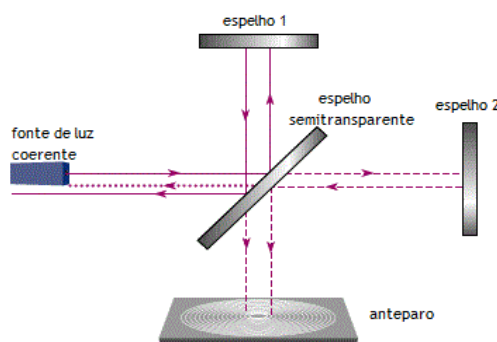
Nos anos seguintes, Michelson repetiu a experiência várias vezes, a última delas em 1929. Outros fizeram o mesmo. Devido ao resultado nulo de todas essas experiências foi sugerido que o éter era arrastado pela terra em seu movimento, mas essa hipótese contrariava o efeito de aberração da Luz. (ZILIO, 2009).

Michelson recebeu o prêmio Nobel em 1907 pelos instrumentos óticos de precisão que construiu e pelas investigações espectroscópicas e metrológicas realizadas; nenhuma menção foi feita sobre as experiências de detecção do vento de éter. Ele mesmo não mencionou em seu discurso de aceitação do prêmio Nobel. Michelson, que sempre aceitou a existência do éter, achava que sua experiência fora um “fracasso” e que o problema exigia uma solução (ZILIO, 2009).

A figura a seguir mostra a representação esquemática simplificada do Interferômetro de Michelson, idealizado em conjunto com Edward Morley, que foi utilizado com a finalidade de investigar a influência do “éter” sobre a velocidade da luz, e com isso verificar a existência (ou não) de um meio material no qual a luz se

propagava (NUSSENZVEIG, 2014).

Figura 7 – Esquema do Interferômetro de Michelson-Morley



Fonte: (MICHELSON; MORLEY, 1887).

Na figura acima é possível entender o funcionamento do interferômetro de Michelson. Uma fonte incide um feixe de luz coerente na direção do aparato separador de feixe (espelho semitransparente) posicionado a 45° em relação a fonte, onde uma parte do raio luminoso atravessa-o em direção a um espelho secundário, fixo atrás do aparato e outro feixe é refletido para outro espelho primário, móvel, acima do aparato, os feixes são refletidos para um mesmo ponto no aparato e depois focalizados para um anteparo, onde é possível observar um padrão de interferência formado devido a diferença de fase entre os raios (CATELLI; VICENZI, 2001).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

Inicialmente pensou-se na confecção de peças em acrílico, mas devido ao alto custo associado ao fato de que as peças poderiam não ter a robustez desejada, logo se optou por outro material, dessa vez o aço, de fácil acesso no mercado local e com baixo valor de venda. O segundo passo foi a busca pela mão de obra qualificada que pudesse fazer as peças em escalas milimétricas, após definido o torneiro mecânico responsável pelo projeto, iniciou-se a construção das peças, esse processo levou aproximadamente dois meses com várias visitas e novas revisões de projeto.

No que se refere ao modelo adotado na confecção das peças, foi utilizado como base o modelo proposto por CORDOVA (2016), neste trabalho o autor propõe a construção de um interferômetro de Michelson com as peças já dimensionadas. De

posse destes dados técnicos, atrelados a uma boa experiência profissional do torneiro mecânico que produziu as peças utilizadas no atual trabalho, foi possível, utilizar materiais e encaixes diferentes do modelo proposto.

As peças listadas na tabela abaixo foram construídas a partir de uma cantoneira de aço com dimensões 2 x 1/8" com 39,3701 polegadas de comprimento, de fácil aquisição em lojas de materiais de metalurgia.

Tabela 1 – Relação das peças e suas respectivas quantidades.

Quantidade	Nome
01	Suporte da fonte de luz laser
01	Suporte do espelho divisor de feixes
01	Suporte do espelho fixo
01	Suporte do espelho móvel

Fonte: Acervo Pessoal (2018).

As imagens mostradas abaixo exemplificam melhor as peças, suas dimensões e as principais características.

Figura 8 – Suporte da fonte de luz laser



Fonte: (Acervo Pessoal, 2018).

O suporte da fonte de luz laser mostrado na figura 8 é constituído por três partes, sendo elas agrupadas por parafusos, arruelas e porcas de 3mm de diâmetro. Sua função dentro do arranjo experimental é servir de suporte para a caneta laser. Ainda dispõem de um mecanismo de regulação de altura em formato de trilho por onde desliza o parafuso da base secundária (base onde fica fixada a caneta laser),

sendo de grande importância para facilitar o ajuste fino.

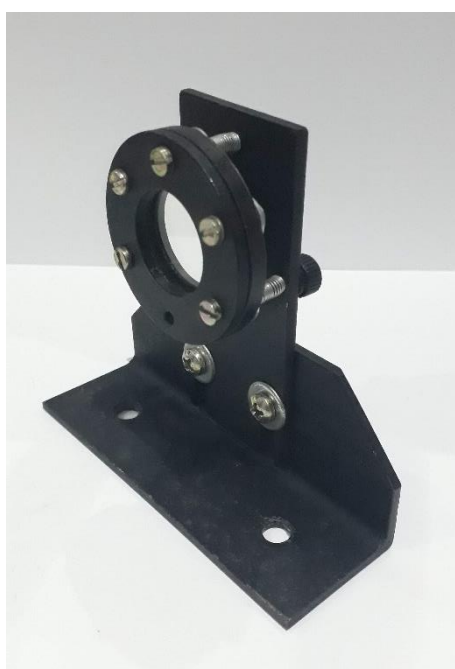
Figura 9 – Suporte do espelho divisor de feixes



Fonte: (Acervo Pessoal, 2018).

O suporte do espelho divisor de feixes representado na figura acima tem um formato retangular, na parte superior é possível observar um orifício circular de 10mm de diâmetro, o mesmo é utilizado para fazer ajustes em um parafuso localizado na face oposta (responsável por fazer a fixação da peça na base). Ainda há uma outra chapa metálica, também retangular, dedicada a fixação do vidro divisor de feixes.

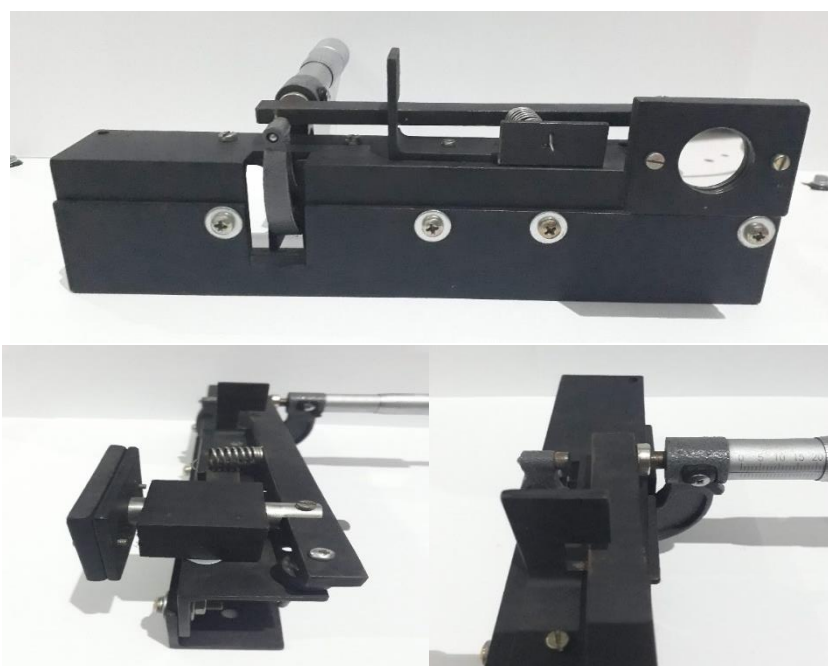
Figura 10 – Suporte do espelho fixo



Fonte: (Acervo Pessoal, 2018).

A figura 10 ilustra o suporte do espelho fixo, constituído por quatro partes, sendo duas circulares destinadas ao acoplamento do espelho plano, que também dispõem do mesmo formato circular, fazendo um encaixe perfeito entre a peça e o espelho. Os ajustes finos são feitos através de três parafusos de 3mm de diâmetro, dispostos em molas do mesmo diâmetro, esta montagem de parafuso dentro das molas se faz necessário para que o ajuste seja muito sutil, facilitando o procedimento de alinhamento do interferômetro.

Figura 11 – Suporte do espelho móvel



Fonte: (Acervo Pessoal, 2018).

A figura 11 é referente ao suporte do espelho móvel, sendo constituído por outras quinze peças menores dispostas em posições estratégicas. Esse arranjo conta com o auxílio de um micrômetro analógico externo $0 - 25\text{mm} \times 0,01\text{mm}$, atrelado a uma haste metálica, que por sua vez está conectada ao êmbolo cilíndrico fixado ao espelho plano, esse mecanismo em formato de “z” faz com que o espelho tenha a capacidade de se movimentar de forma micrométrica. Assim, esta peça é responsável pela movimentação das franjas de interferências que deverão ser formadas no anteparo após o procedimento de alinhamento dos feixes luminosos.

3.2. MONTAGEM

Na figura acima é possível notar que a caneta de luz laser já se encontra acoplada na base por meio de abraçadeiras de nylon de tamanho pequeno. Para a obtenção do padrão de interferência utilizou-se uma caneta laser de cor verde, com comprimento de onda $\lambda = 532nm$. A vantagem de utilizar esse tipo de fonte luminosa, se dá pelo fato de que a luz que sai do laser é coerente e monocromática.

Figura 12 – Suporte e caneta laser



Fonte: (Acervo Pessoal, 2018).

Com o objetivo de automatizar o sistema de acionamento da caneta laser utilizou-se um circuito eletrônico simples montado em uma protoboard, constituído por diversos componentes eletrônicos, dentre eles um potenciômetro que auxilia na regulação da intensidade luminosa, o circuito também conta com uma fonte de tensão AC/DC de 9V, dispensando a utilização de pilhas.

Figura 13 – Suporte e espelho semi-refletor (divisor de feixes)



Fonte: (Acervo Pessoal, 2018).

Foi usado um pedaço retangular de vidro comum verde com espessura de $d = 3,8mm$. Dentre outros tipos de vidro, com cores e espessuras diferentes, essa foi a que melhor se adaptou às necessidades do trabalho. Por se tratar de um vidro comum, adquirido em uma vidraçaria local sem o devido tratamento óptico feito em laboratórios especializados em interferometria, o vidro utilizado não era capaz de dividir os dois feixes com a mesma intensidade luminosa, mas por se tratar de uma diferença pequena, esse problema não afetou o resultado final do experimento.

Para a execução desse experimento foram utilizados dois espelhos planos. O primeiro sendo acoplado no suporte do espelho fixo (figura 10) e o segundo no suporte do espelho móvel (figura 11), contendo as seguintes especificações: plano, sem nenhum tipo de grau, de primeira face e cortados em formato circular para poder ser encaixado na base. É o mesmo tipo de espelho encontrado em retrovisores de automóveis.

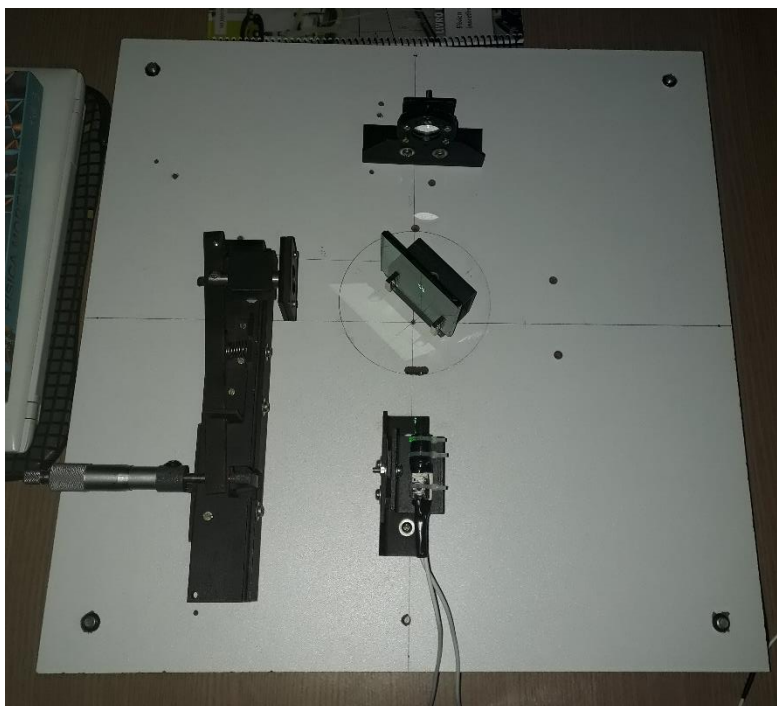
Na montagem original proposta por CORDOVA (2016), foi utilizada uma lente divergente na saída do divisor de feixes para que o padrão de interferência pudesse ser ampliado no anteparo, facilitando a visualização, identificação e contagem das franjas de interferências. No interferômetro proposto neste trabalho utilizou-se a lente divergente da própria caneta laser localizada na ponta da caneta, a mesma permitia uma regulação mais precisa, pois conta com um encaixe em formato de rosca. Nesta configuração foi possível visualizar o padrão no anteparo de forma nítida e clara.

Para melhor adequação da prática experimental foi utilizado um anteparo retangular de $30cm \times 40cm$ de cor clara localizado a $2m$ de distância do interferômetro. A vantagem é o seu formato compacto que pode ser facilmente posicionado em locais diferentes dentro da sala. É importante ressaltar que o anteparo pode ser substituído por uma parede branca ou um pedaço de cartolina branca.

3.3. ALINHAMENTO

Todas as peças devem ser fixadas com a utilização de parafusos de $3mm$ a $5mm$ de diâmetro, em uma base plana que pode ser de MDF® (Medium Density Fiberboard) ou uma pedra de mármore, essa base também deve conter sapatas niveladoras para que o experimento possa ser utilizado mesmo em superfícies irregulares. A base também deve ser rígida a ponto de evitar deformações de caráter mecânico ou térmico e pesada o suficiente para evitar movimentos acidentais.

Figura 14 – Posicionamento das peças sobre a base



Fonte: (Acervo Pessoal, 2018).

Neste trabalho optou-se por usar uma placa de MDF na cor branca de $50\text{cm} \times 50\text{cm}$, com sapatas niveladoras emborrachadas acionadas utilizando parafuso e rosca. Para o melhor posicionamento das peças que compõem o experimento sobre a base, foram feitas marcações para determinar o centro da base e outras duas marcações circulares para garantir que os dois espelhos (fixo e móvel) estejam equidistantes ao centro da base.

É importante ressaltar que esse é um experimento extremamente sensível a vibrações mecânicas, logo essas informações extras ajudam a garantir que o instrumento sofra o mínimo de perturbações mecânicas, que poderão ocorrer na hora da calibração ou por meio de fatores externos.

Com as quatro peças dispostas na base, conforme ilustrado na figura acima, deve-se ligar a fonte de luz laser e projetá-la em direção ao espelho semi-refletor, ou simplesmente divisor de feixes, que estará posicionado no centro da base em um ângulo de 45° em relação a fonte de laser. Neste trabalho o divisor de feixes utilizado foi um pedaço de vidro comum (sem grau), em formato quadrado e na cor verde.

Devido ao seu caráter de divisão de feixes este vidro não poderia ser totalmente transparente, pois para que a experimentação ocorra de forma satisfatória, deve haver o fenômeno de transmissão e reflexão dos feixes. Dentre os vidros

testados, obtidos por meio de fácil aquisição no mercado local, o vidro comum verde foi o que melhor atendeu às necessidades.

Na figura 15 nota-se que o vidro é maior que sua base de sustentação, esse fato se deu para melhorar o procedimento de alinhamento do feixe após a reflexão proveniente do espelho fixo, que está localizado atrás do divisor de feixes.

Figura 15 – Incidência da luz laser no espelho semi-refletor



Fonte: (Acervo Pessoal, 2018).

O espelho semi-refletor tem por principal finalidade dividir o feixe de laser em outros dois feixes perpendiculares entre si, estes devem conter a mesma intensidade luminosa (ou algo bem próximo). Esses dois feixes perpendiculares serão direcionados ao espelho fixo e ao espelho móvel, ao incidirem nos espelhos ocorrerá o fenômeno de reflexão, então os feixes retornarão ao espelho divisor, que por sua vez deverão ser direcionados para o anteparo onde o padrão de interferência deve ser observado.

Sobre a montagem dos espelhos, o espelho fixo deve estar montado em um suporte fixo em forma de “L” e como configuração de ajuste fino do espelho, o mesmo deve possuir parafusos destinados a movimentação do espelho. O segundo espelho denominado espelho móvel é maior e tem como ferramenta de ajuste fino um micrômetro, que tem por característica fazer deslocamentos micrométricos no

espelho. Assim que os feixes de laser incidem nos espelhos são instantaneamente refletidos retornando ao espelho divisor e posteriormente serão projetados em direção ao anteparo. O anteparo é o lugar onde o experimentador poderá observar o padrão sendo formado.

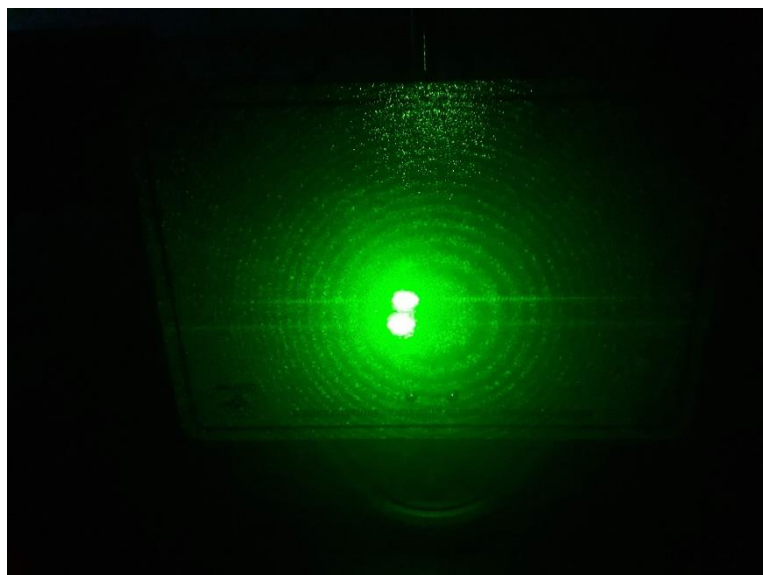
Um detalhe de fundamental importância ocorrerá quando os feixes refletidos pelos espelhos planos retornarem ao espelho semi-refletor, devido as peças estarem em posições predeterminadas, certamente os feixes aparecerão em pontos diferentes no espelho semi-refletor, então com o auxílio dos parafusos de ajuste fino localizados no espelho fixo deve-se fazer com que os feixes estejam no mesmo ponto dos feixes vindo do espelho móvel, quando isso ocorre é observado no anteparo um padrão de interferência (listras mais claras e listras mais escuras).

Esse padrão de interferência pode conter traços retos ou concêntricos. Quando obtido os traços concêntricos significa que foi obtido o alinhamento perfeito. Outras informações adicionais podem ajudar a obter um padrão concêntrico, a distância entre os dois braços (distância entre o espelho semi-refletor e os espelhos planos) deve ser a mesma. Em alguns casos é necessária a adição de uma lente divergente de foco entre 20nm e 50nm entre a fonte e o espelho divisor de feixes a fim de formar um cone de luz.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após executado os passos anteriores tais como, posicionamento das peças sobre a base, garantindo que as mesmas estão afixadas e imóveis, a ponto de não haver variação no comprimento dos braços. Garantindo o alinhamento dos feixes antes e depois de incidir no espelho divisor de feixes e por último, mas não menos importante, a estabilização do equipamento por completo. A fim de garantir um padrão de interferência limpo e claro, como o que se pode observar na figura abaixo.

Figura 16 – Padrão de interferência projetado no anteparo



Fonte: (Acervo Pessoal, 2018).

Na imagem ilustrada acima é possível ver um padrão de franjas claras e escuras bem definidas, em formato circular, projetadas em um anteparo localizado a dois metros de distância da mesa onde o interferômetro foi montado. Para garantir que o padrão observado corresponde ao esperado para o fenômeno de interferência, e não de difração (já que são padrões semelhantes, diferindo apenas na forma em que são gerados), foram feitas várias mudanças de posição no tambor do micrômetro instalado na base do espelho móvel.

Considerando que a função do micrômetro é exclusivamente a movimentação do espelho, para que ocorra uma variação de tamanho micrométrico na posição do espelho móvel em relação ao espelho fixo. Pequenas variações como estas são o suficiente para que haja uma diferença de caminho ótico e assim é possível observar as mudanças de posição das franjas no anteparo a “olho nu” de forma limpa e clara.

Até aqui foi realizada uma discussão qualitativa da diferença de fase entre as duas ondas para os quais a intensidade refletida (ou transmitida) é máxima ou mínima, não é objetivo deste trabalho analisar a fundo como varia a intensidade entre os máximos e mínimos, ficando a cargo dos próximos trabalhos utilizando esta mesma configuração de interferômetro.

Mas, pode-se mencionar que a interferência entre máximos e mínimos está relacionada com a variação da intensidade luminosa que depende da refletividade das interfaces, que é a porcentagem de reflexão, ou seja, a fração da intensidade que se reflete.

5 CONCLUSÃO/ CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho consistiu em fazer a imersão do aluno licenciando em física na rotina diária de um laboratório de física, sendo protagonista em suas próprias práticas experimentais, tendo a oportunidade de vivenciar de perto através de erros e acertos a essência do que vem a ser a física experimental, utilizando de métodos e técnicas desenvolvidas desde a época de Galileu Galilei.

Esse experimento é clássico no que se refere a história da física, mesmo com resultados diferindo do esperado, serviu de base para que Albert Einstein começasse a idealizar o que hoje conhecemos como física moderna.

A construção de tal experimento é de alta complexidade, uma vez que o principal fenômeno físico do experimento é o de interferência de ondas luminosas. Na prática, com a construção do aparato experimental, ficou evidente que para obter medidas mais precisas era necessário que o instrumento estivesse bem calibrado e muitas vezes isso não foi possível devido a problemas externos.

O atual experimento está pronto para iniciar uma próxima fase, que é a execução de medidas, tais como: o comprimento de onda de luz monocromática, índice de refração de um gás, comparação de superfícies planas, velocidade da luz, dentre outros que podem ser executados fazendo algumas modificações nesta montagem através de adição de outras peças.

É importante mencionar que essas medidas não foram contempladas neste trabalho, pois se tratando do grau de precisão a ser alcançado apenas para obter o padrão de interferência, o projeto precisou ser revisto e modificado várias vezes, até atingir sua forma final.

REFERÊNCIAS

CATELLI, Francisco; VICENZI, Scheila. Interferômetro de Michelson. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Caxias do Sul, v. 18, n. 1, abr. 2001.

CORDOVA, Hercilio Pereira. Construindo o Interferômetro de Michelson-Morley. 2016. 37 f. Dissertação (Pós-Graduação em Ensino de Física) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: https://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2016_Hercilio_Cordova/material_instrucional_Hercilio_Cordova_1.pdf. Acesso em: 17 dez. 2019.

GALIAZZI, M. do C., ROCHA, J. M. de B., SCHMITZ, L. C., SOUZA, M. L., GIESTA, S., GONÇALVES, F. P. Objetivos das atividades experimentais no ensino médio: a pesquisa coletiva como modo de formação de professores de ciências. Ciência & Educação, v.7, n.2, p.249-263, 2001.

n, David J. Eletrodinâmica. Trad: Heloisa Coimbra de Souza; Rev: Antonio Manoel Mansanares. 3ª Ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2011.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos da Física: Óptica e Física Moderna, Vol. 4, 9 Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 349p.

MICHELSON, Albert A.; MORLEY, Edward W. On the relative motion of the earth and the luminiferous ether. American journal of science, New Haven, v. xxxiv, n. 203, november 1887.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. Curso de Física Básica: Mecânica. Vol. 1, 5 Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, LTDA, 2013. 394p.

_____. Curso de Física Básica: Ótica, relatividade, física quântica. Vol. 4, 2 Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, LTDA, 2014. 359p.

OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. Astronomia e astrofísica. 4. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2017. 614p.

PACHECO D.. A experimentação no ensino de ciências. Revista Ciência e Ensino, Campinas, v. 2, p.10, jun, 1997.

PIRES, A.S.T. Evolução das idéias da Física. 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2008. 478 p.

_____. Evolução das idéias da física. 2 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011. 478 p.

SILVA, Cristian Costa e; GIACOMELLI, Alisson Cristian; PÉREZ, Carlos Ariel Samudio; SILVA, Barbara Locatelli da. Revista brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia, Ponta Grossa, v. 10, n. 1, p. 1-15, jan./abr. 2017. ISSN 1982-873X.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. Física Moderna. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

ZILIO, Sérgio Carlos. Óptica Moderna: Fundamentos e aplicações. São Carlos: Compacta, 2009. 300p.

WIKIPÉDIA. 2016. Disponível em:
<<https://pt.wikipedia.org/wiki/Interfer%C3%Aancia>>. Acesso em: 04/08/17.

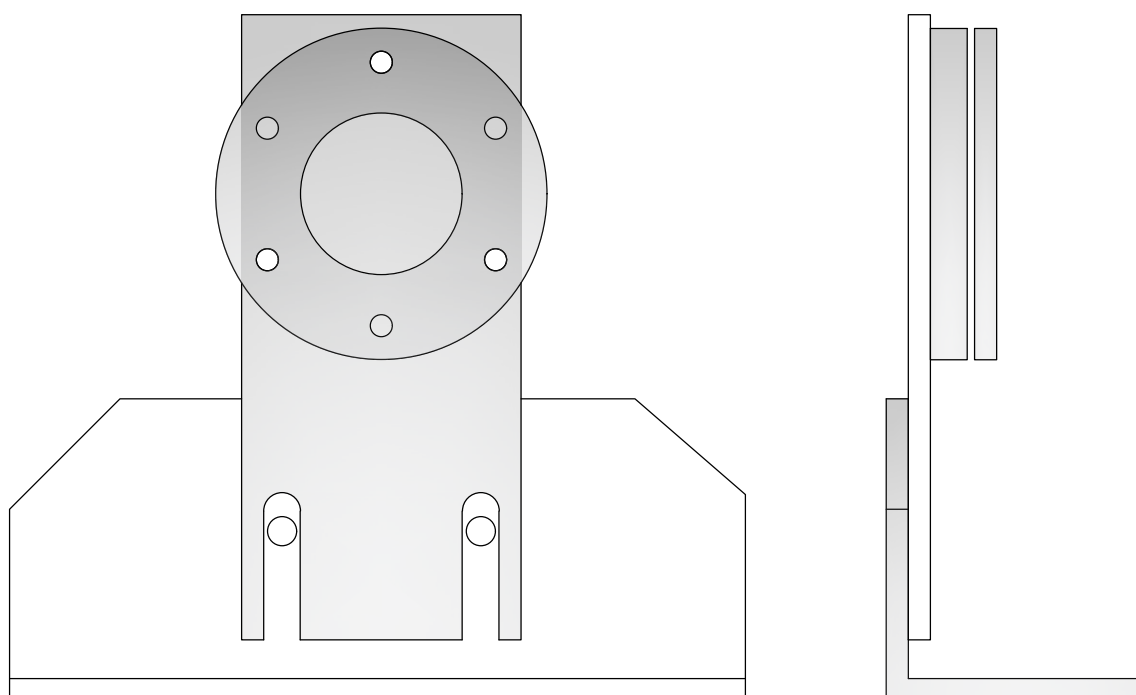
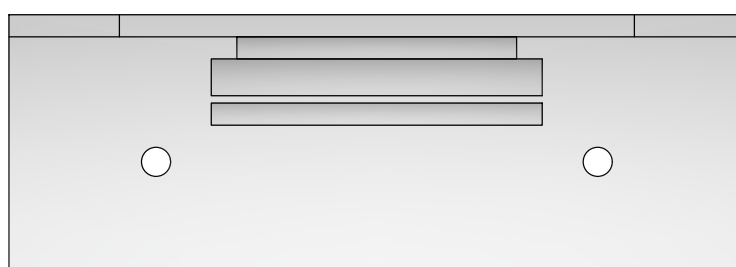
WIKIWAND. Disponível
em: <http://www.wikiwand.com/pt/Interfer%C3%B4metro_de_Michelson>. Acesso
em: 04/08/17.

ANEXO A – DESENHO DAS PEÇAS E SUAS MEDIDAS.

SUPOORTE DO ESPELHO FIXO (4 PARTES)

PROJEÇÃO 2D

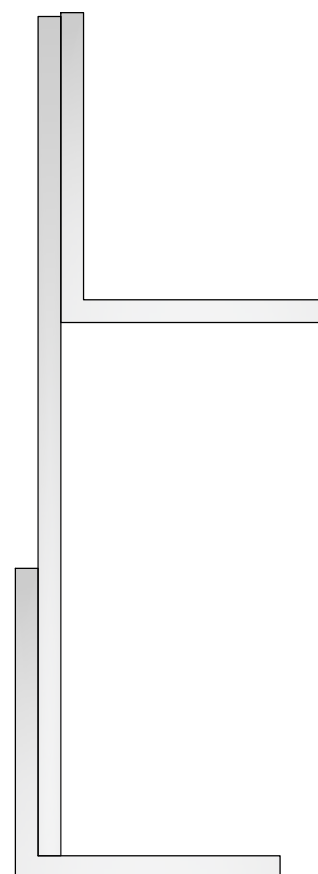
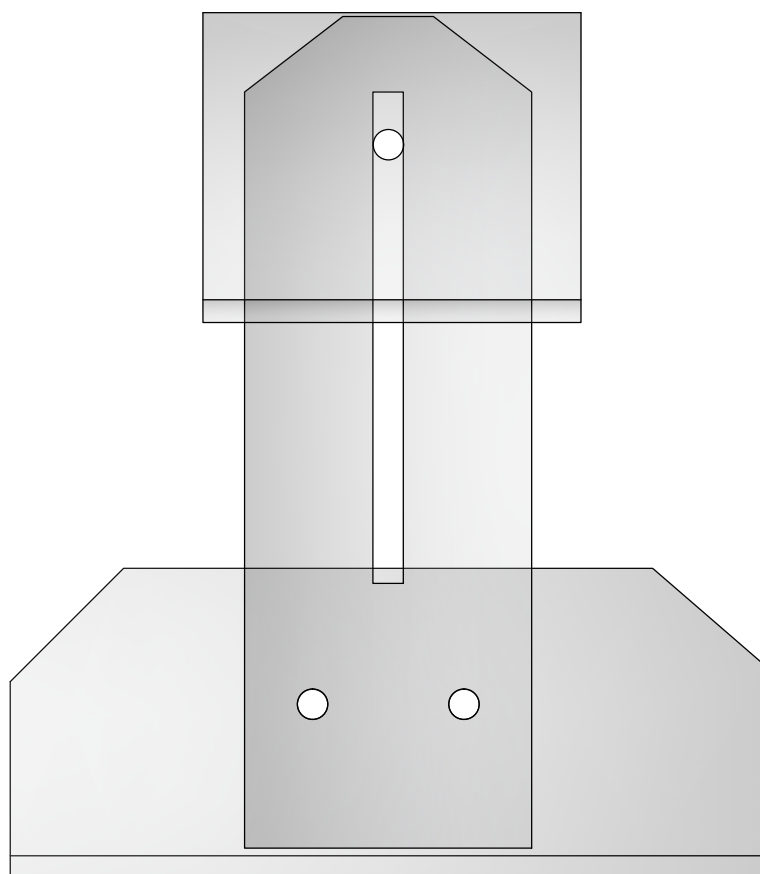
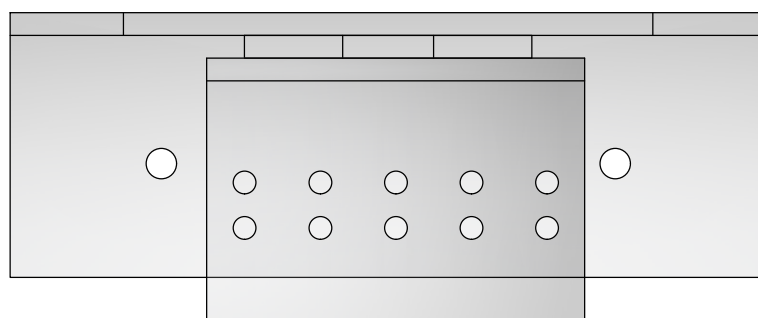
48



SUORTE DA LUZ LAZER (3 PARTES)

PROJEÇÃO 2D

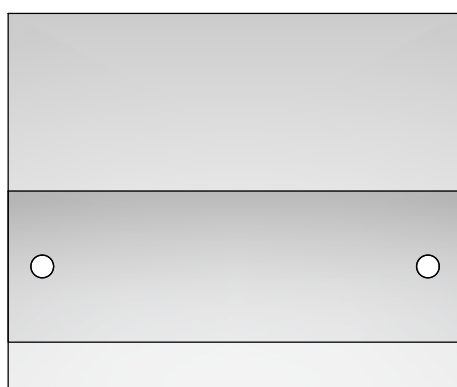
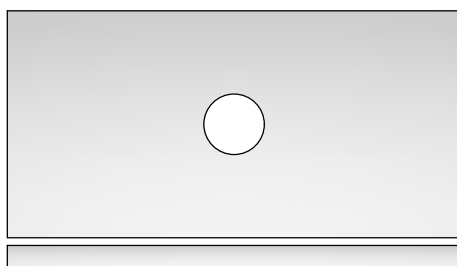
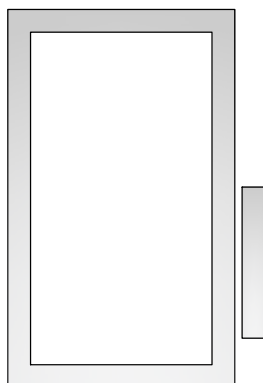
49



SUPORTE DO ESPELHO DIVISOR DE FEIXES (2 PARTES)

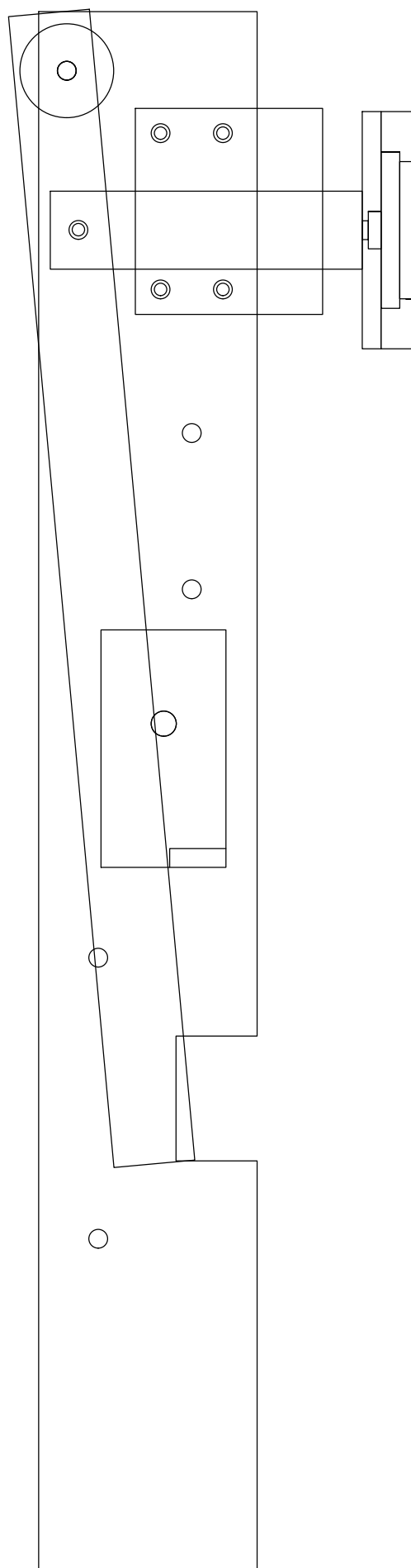
PROJEÇÃO 2D

50

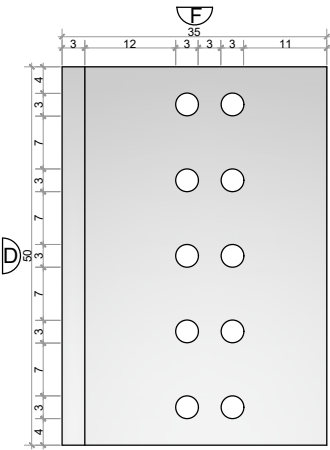


SUPORTE DO ESPELHO MOVEL (12 PARTES) PROJEÇÃO 2D

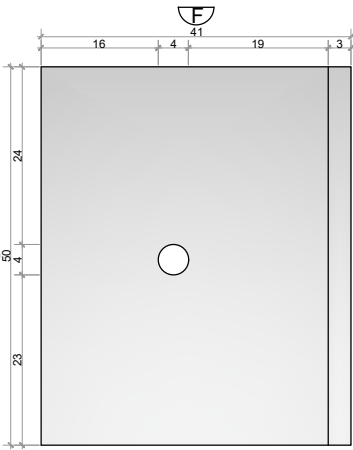
51



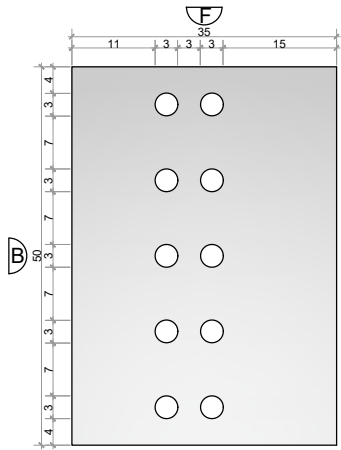
SUPORE DA LUZ LAZER (3 PARTES)
PARTE 01



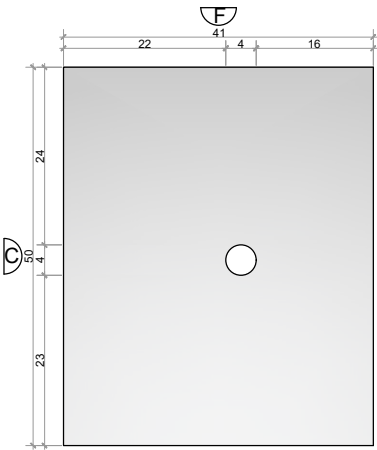
Vista 'A'



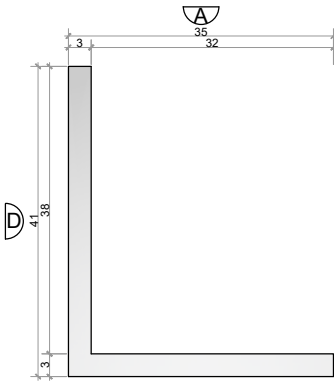
Vista 'B'



Vista 'C'

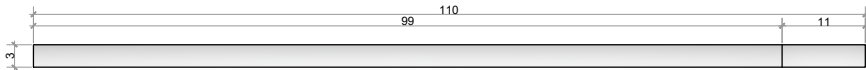


Vista 'D'

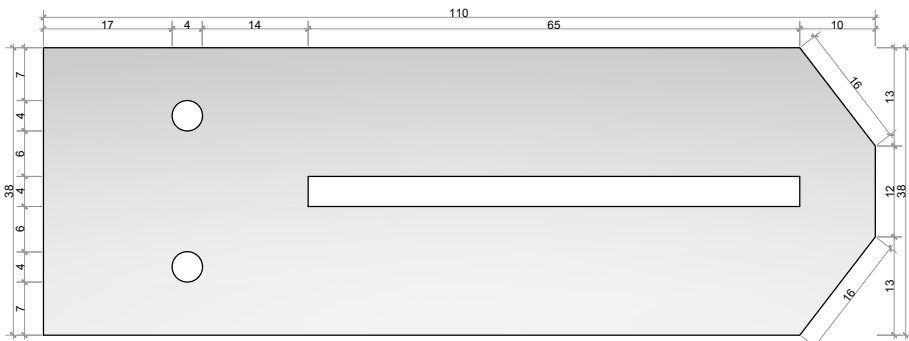


Vista 'E'=F'

PARTE 02

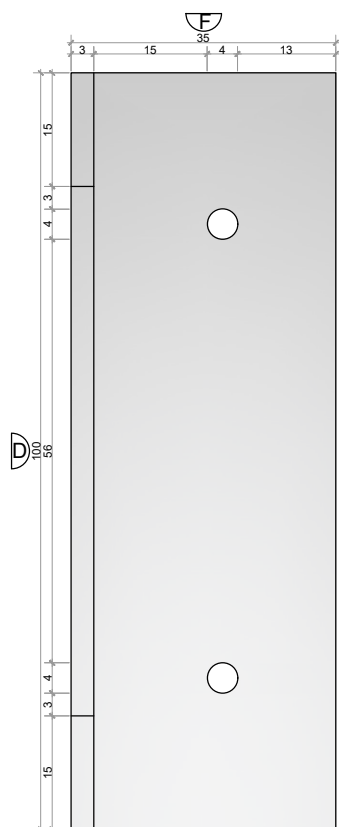


Vista 'B'

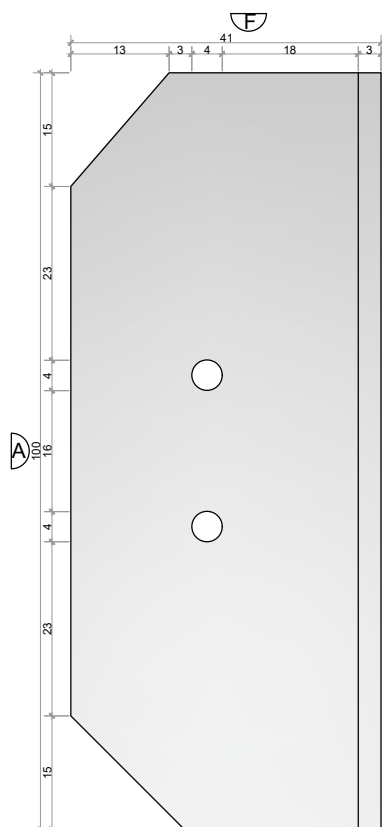


Vista 'A'

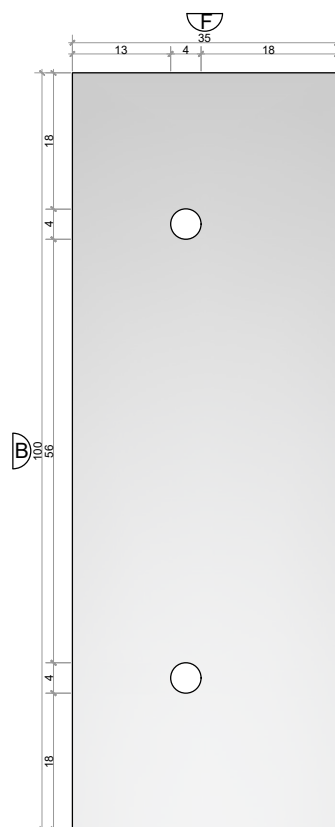
PARTE 03



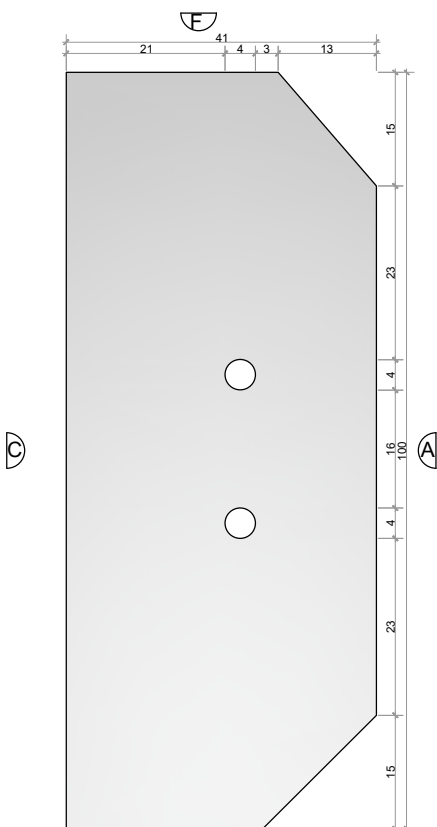
Vista 'A'



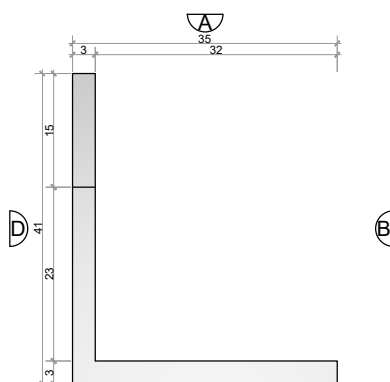
Vista 'B'



Vista 'C'

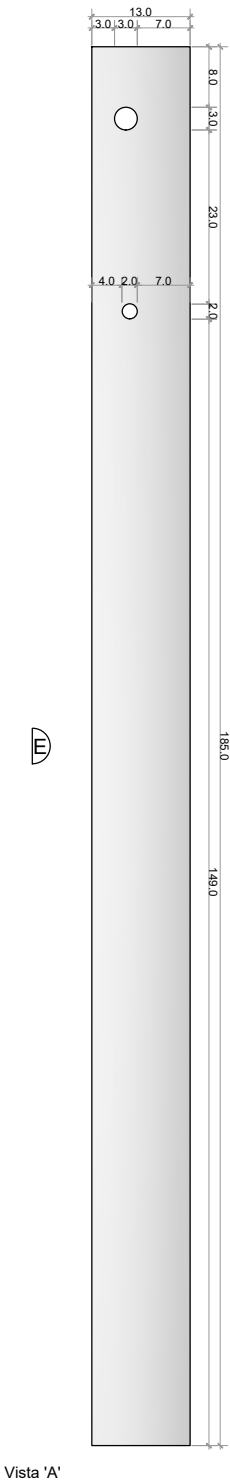


Vista 'D'

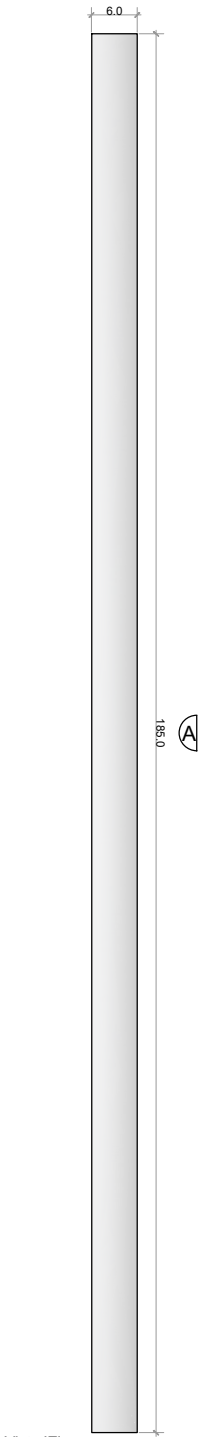


Vista 'E=F'

SUPORTE DO ESPELHO MOVEL (12 PARTES)
PARTE 12



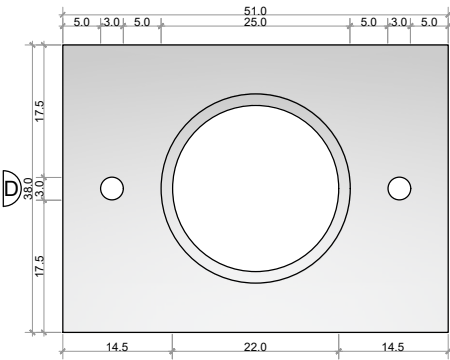
Vista 'A'



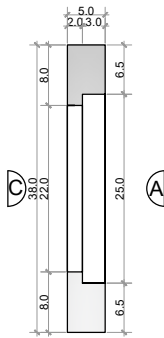
Vista 'E'

SUPOORTE DO ESPELHO MOVEL (12 PARTES)

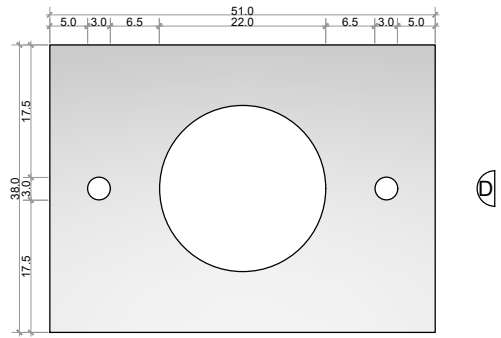
PARTE 08



Vista 'A'

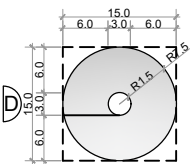


Vista 'D'

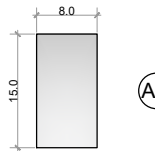


Vista 'C'

PARTE 09

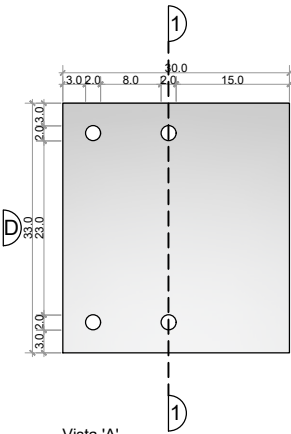


Vista 'A'

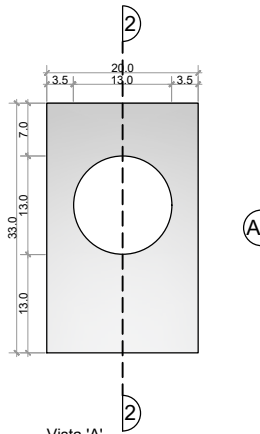


Vista 'D'

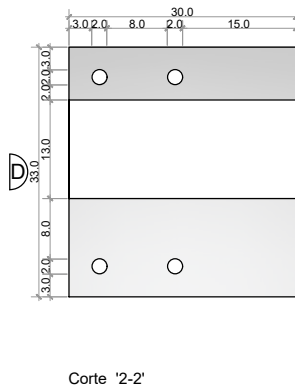
PARTE 10



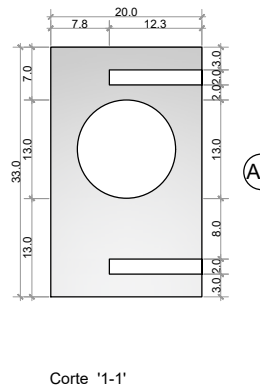
Vista 'A'



Vista 'A'

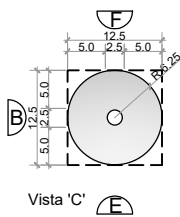


Corte '2-2'

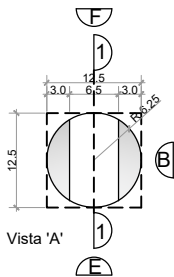


Corte '1-1'

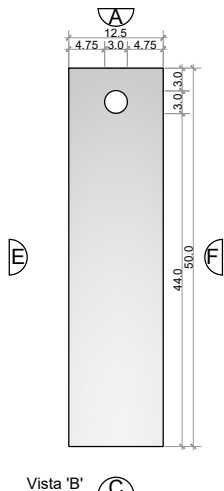
PARTE 11



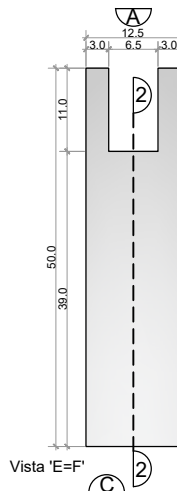
Vista 'C'



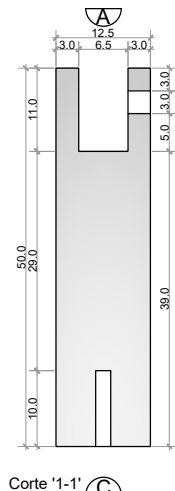
Vista 'A'



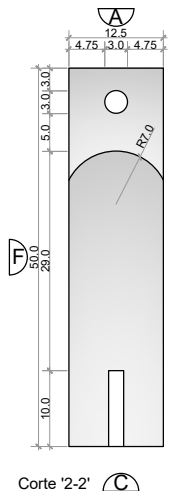
Vista 'B'



Vista 'E=F'



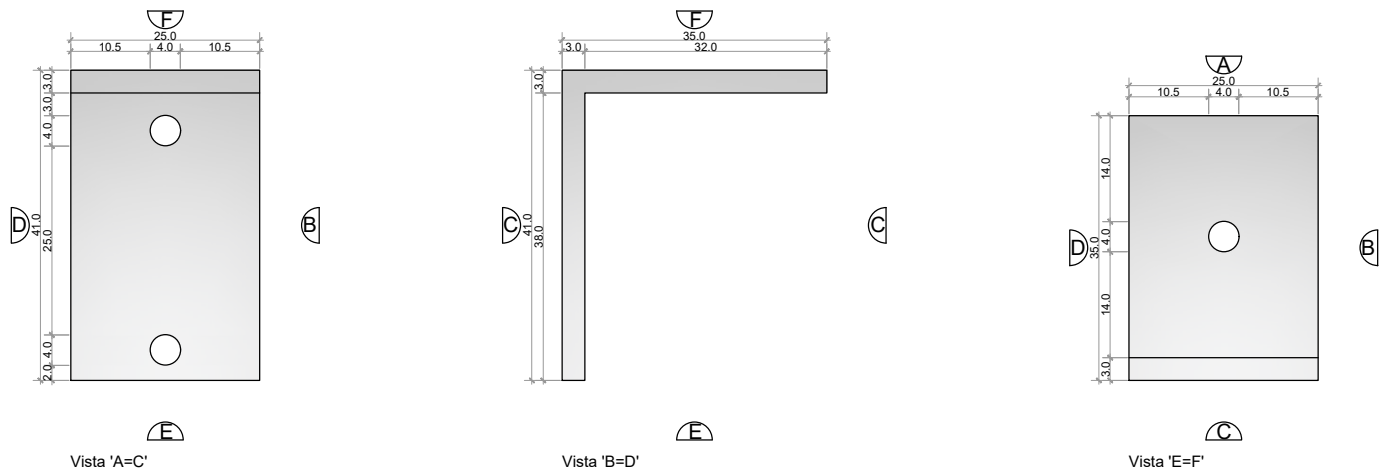
Corte '1-1'



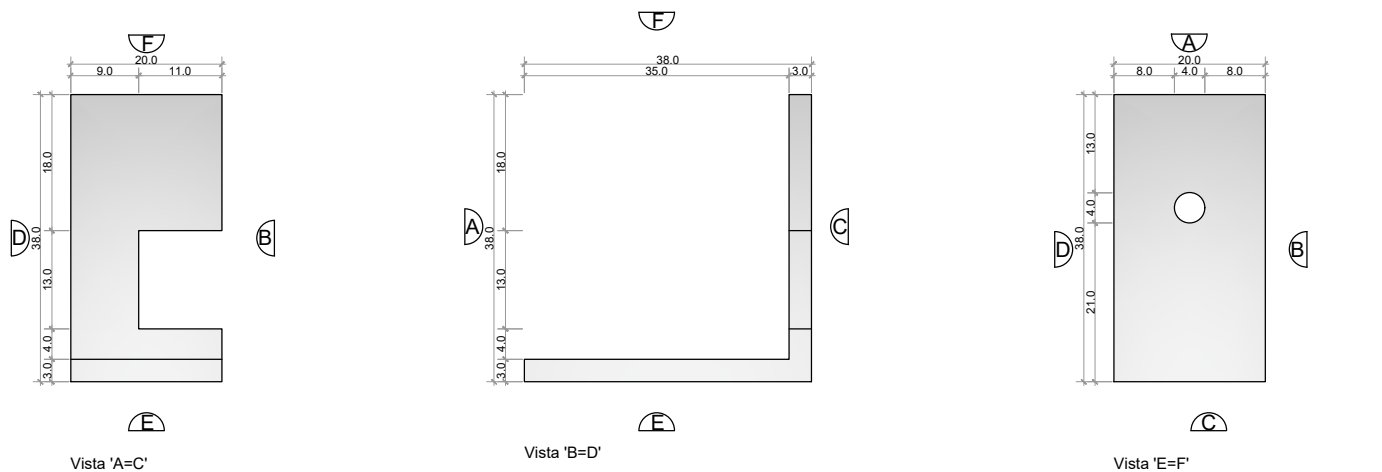
Corte '2-2'

SUPOORTE DO ESPELHO MOVEL (12 PARTES)

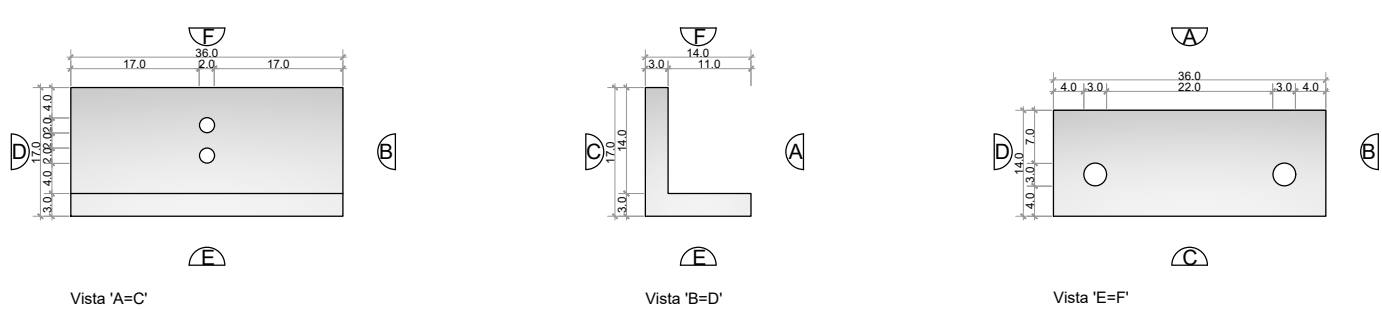
PARTE 03=04



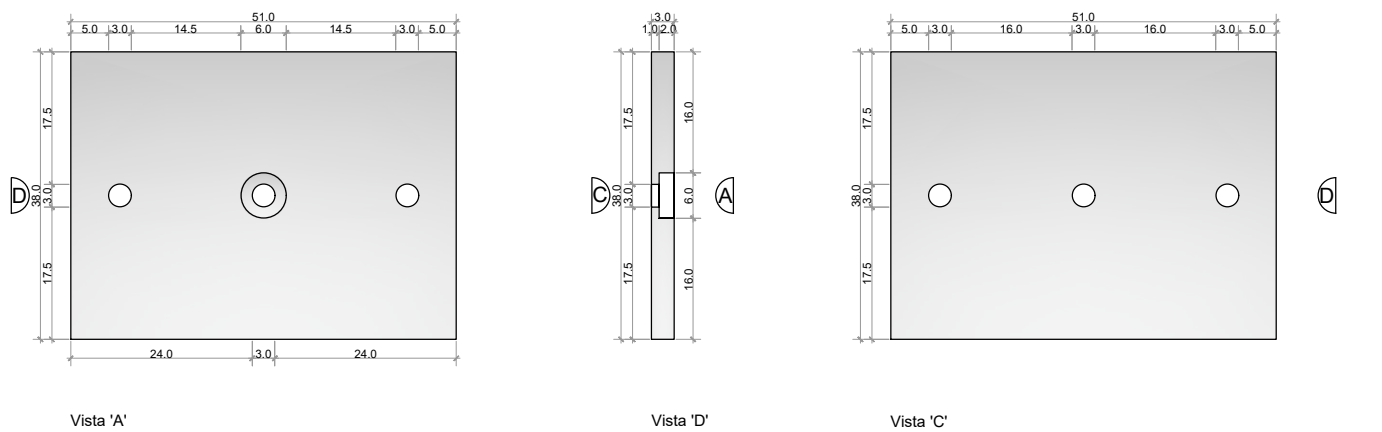
PARTE 05



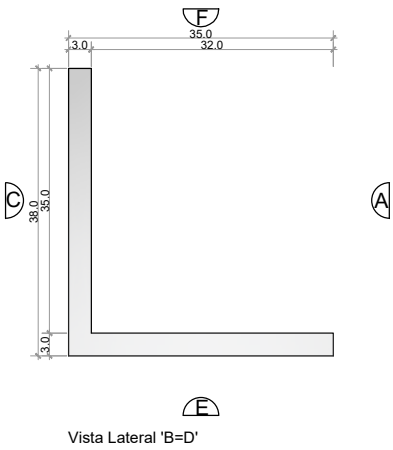
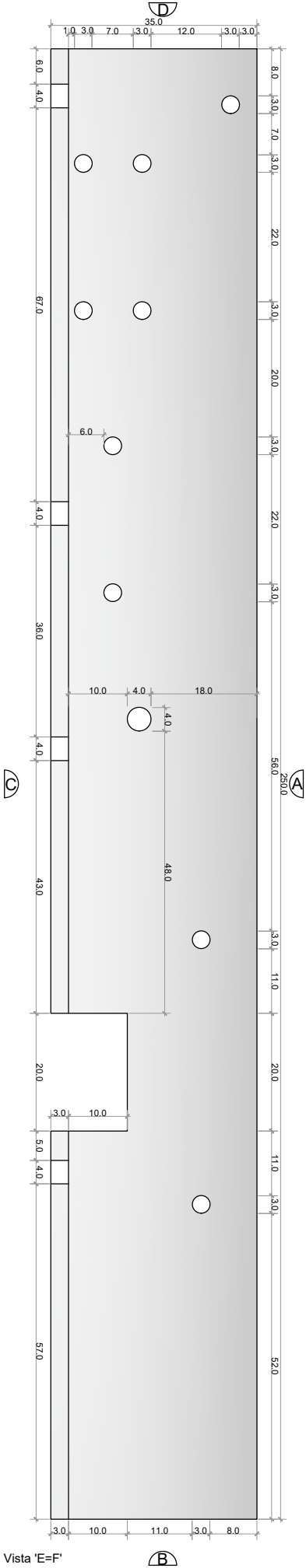
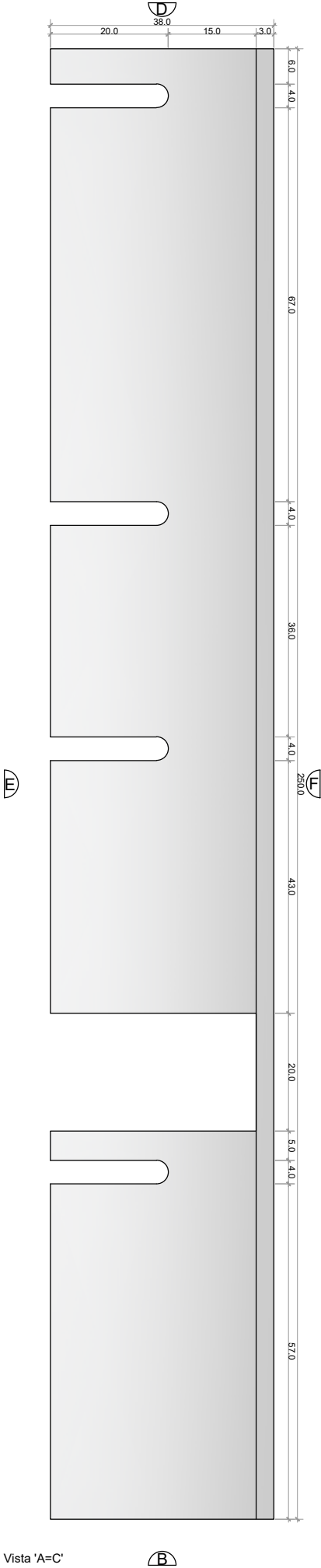
PARTE 06



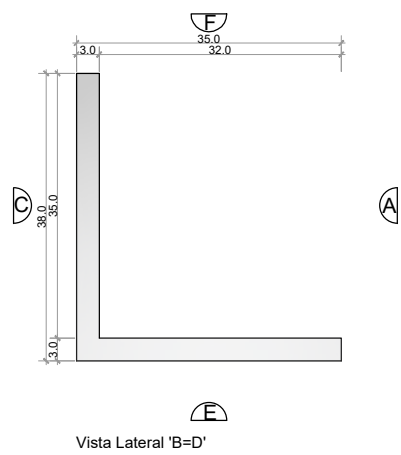
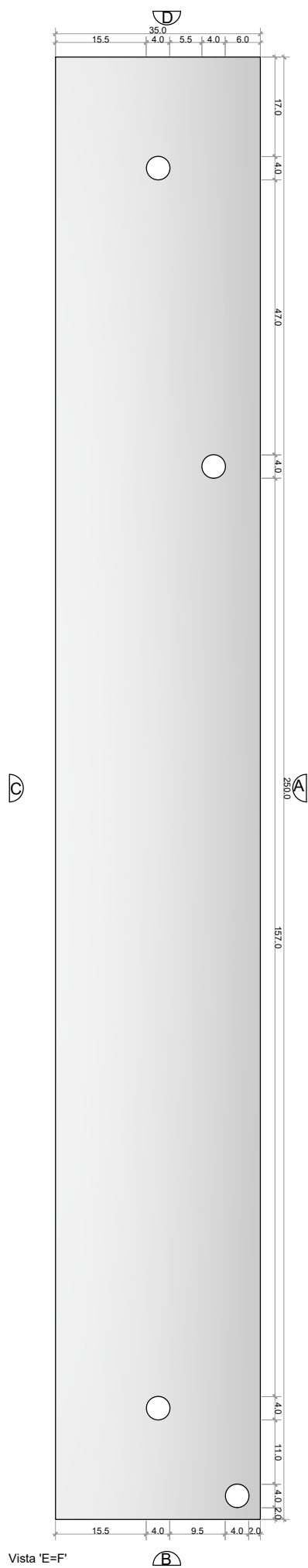
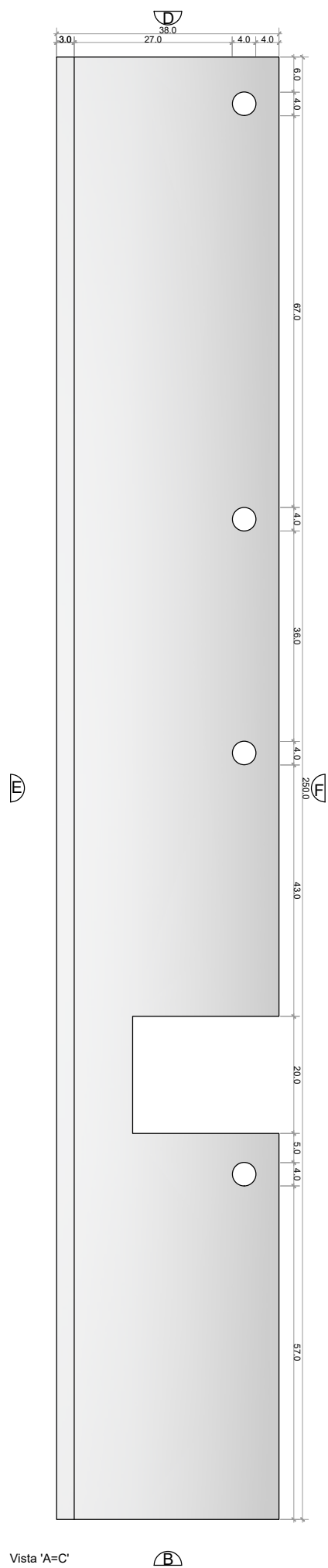
PARTE 07



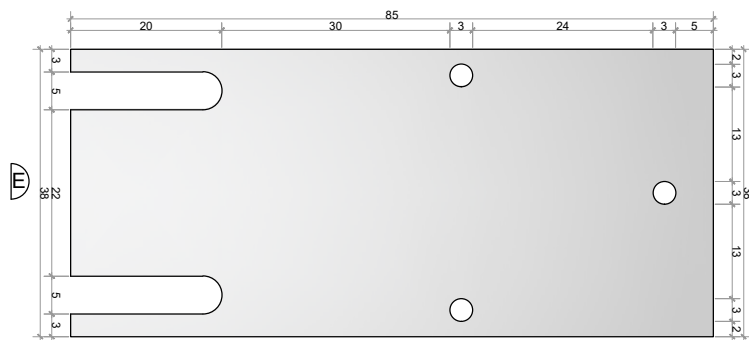
SUPOORTE DO ESPELHO MOVEL (12 PARTES)
PARTE 02



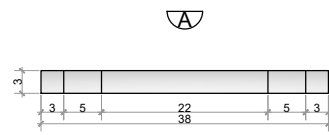
SUPOORTE DO ESPELHO MOVEL (12 PARTES)
PARTE 01



SUPOORTE DO ESPELHO FIXO (4 PARTES)
PARTE 02

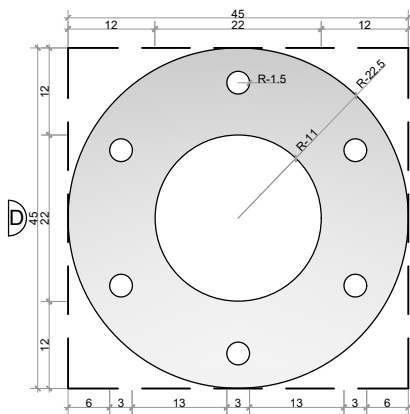


Vista 'A'

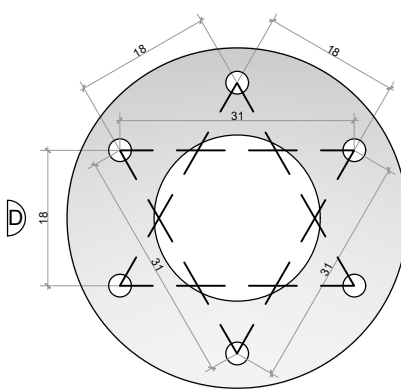


Vista 'E'

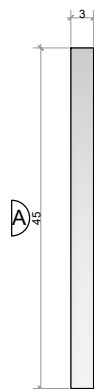
PARTE 03



Vista 'A'

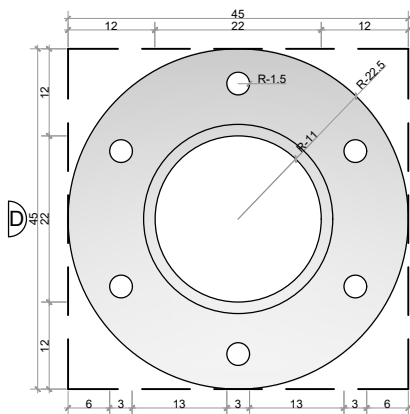


Vista 'A'

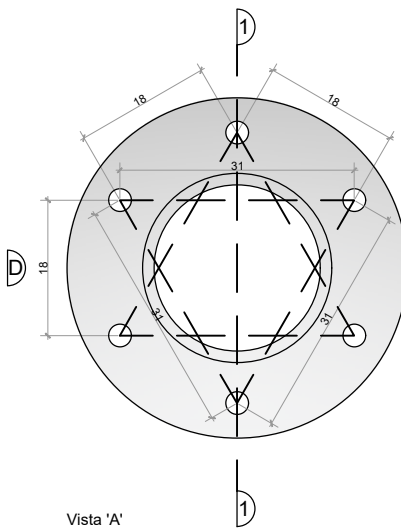


Vista 'D'

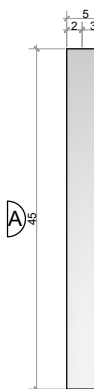
PARTE 04



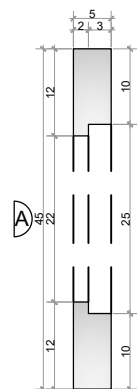
Vista 'A'



Vista 'A'



Vista 'D'

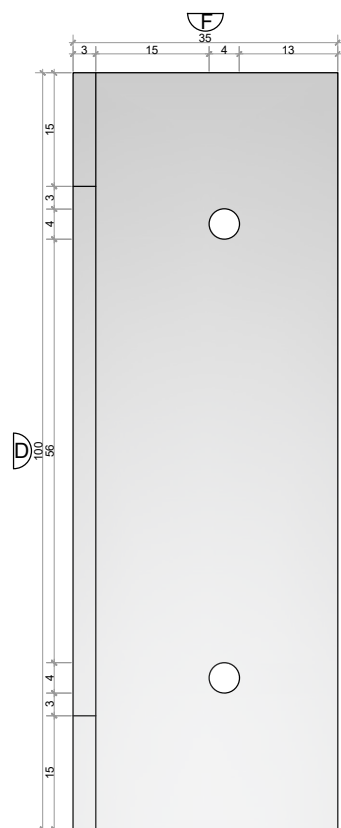


Corte "1-1"

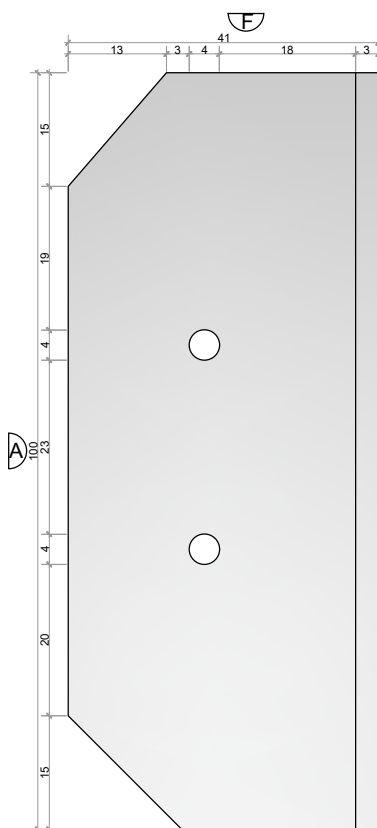
SUPOORTE DO ESPELHO FIXO (4 PARTES)

60

PARTE 01



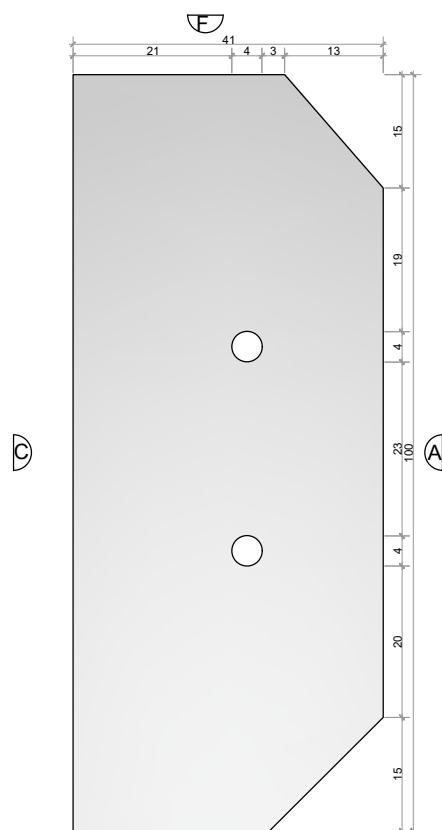
Vista 'A'



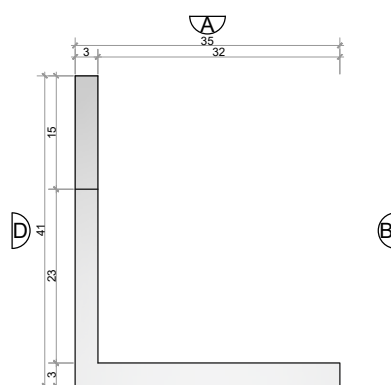
Vista 'B'



Vista 'C'



Vista 'D'



Vista 'E=F'

The figure shows three orthographic views of a mechanical part:

- Vista 'A'**: Front view showing a rectangular plate with a central circular hole. Dimensions include a total width of 26 and a height of 26.
- Vista 'B'**: Top view showing the rectangular plate from above. It features two circular holes arranged vertically. Dimensions include a total length of 50 and a width of 32.
- Vista 'C'**: Side view showing the profile of the part. It features a U-shaped cutout in the center. Dimensions include a total height of 48 and a width of 24.

