

**Universidade Estadual de Campinas**

Instituto de Física “Gleb Wataghin”

Tópicos de Ensino de Física I – F609B  
Primeiro semestre de 2007

**Relatório Final:**

**Formação de pseudo-imagem através de superfície cilíndrica espelhada**



João Paulo da Silva (RA: 024113)  
joao\_paulo11@yahoo.com.br

Orientador: Prof. Dr. Mário Noboru Tamashiro  
mtamash@ifi.unicamp.br

Coordenador: Prof. Dr. Jose Joaquín Lunazzi

## ***1 – Introdução:***

Experimentos envolvendo imagens e sua formação sempre nos prendem a atenção, principalmente quando conseguimos observar padrões que intuitivamente não esperaríamos, tais como imagens peculiares, ilusões de óptica, efeitos visuais, uma holografia, uma sombra na parede ou até mesmo um arco-íris. Estes exemplos muitas vezes aguçam nossa curiosidade e nos motiva a desvendar como “*as coisas funcionam*”. O que propomos através deste experimento, que de maneira análoga desperta o interesse e impulsiona às descobertas científicas, é a formação de pseudo-imagem através de uma superfície cilíndrica espelhada. Esta será implementada, de uma maneira mais elementar, por uma chapa metálica recobrando a superfície interna de um tubo de PVC comum presente em qualquer estabelecimento de material para construção. O espelho assim construído, de formato cilíndrico, servirá para evidenciar uma característica observacional bastante intrigante, pois quando depositamos um pequeno objeto (brinquedo em miniatura) neste simples aparato, o padrão de imagem formado parecerá, para um observador posicionado de maneira a olhar o cilindro lateralmente, como se estivesse “flutuando” no interior deste cilindro. Além disso, se fixarmos o olhar nessa imagem gerada e circundarmos este mesmo aparato a fim de “enxergar” o outro lado da figura, perceber-se-á que a imagem formada acompanhará seu movimento, de modo a sempre manter a posição inicial da imagem em relação ao observador. Podemos melhorar essas “sensações” se iluminarmos todo o conjunto com uma luminária e incidirmos um feixe de raio laser (gerado por caneta laser de diodo) na imagem formada, aumentando desta forma a sensação de tridimensionalidade e a nitidez.

## ***2 – Teoria:***

Quando um objeto é inserido no interior de uma superfície cilíndrica espelhada, de preferência no eixo (centro) do cilindro, observa-se a formação de um contínuo de pseudo-imagens ao longo deste mesmo eixo, conforme mostra a Fig. 1, que eventualmente podem possuir boa qualidade. Este padrão pode ser tão bom quanto se queira, bastando para isso que a superfície formada pela chapa espelhada esteja mais próxima possível de um cilindro perfeito, ou seja, sem quaisquer sinais de vincos, dobras ou partes achatadas (localmente planas). Essa preocupação torna-se desnecessária quando pensamos no cilindro de vidro metalizado também proposto neste experimento. Se aproximarmos o pequeno objeto das paredes do cilindro espelhado, perceberemos que sua imagem sofrerá deformações devido à aberração esférica, que dentro de certos limites pode ser tolerada, pois não afetará consideravelmente a qualidade da imagem formada. Em uma abordagem menos superficial e mais técnica, temos que o efeito observado não é tecnicamente uma imagem, pois nem

todos os raios oriundos do objeto irão convergir em um único ponto (como acontece em espelhos esféricos). Em vez disso, o espelho cilíndrico irá se comportar como um elemento óptico formado pela imagem de um ponto em um segmento de linha no eixo óptico, designado tecnicamente por *axicon* [1].

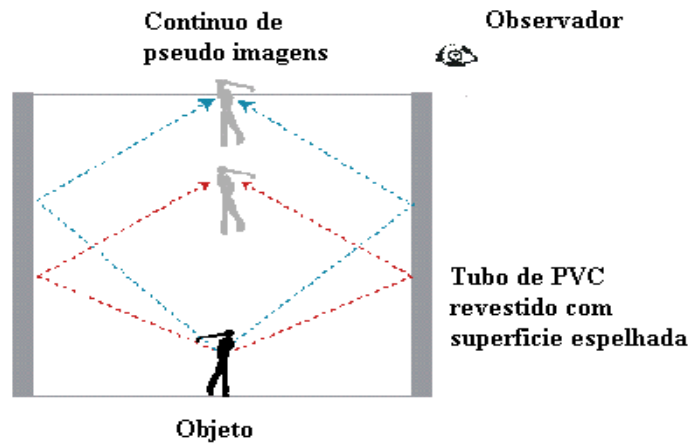


Fig. 1 – Processo de formação da pseudo-imagem em uma superfície refletora cilíndrica.

Os raios oriundos de cada ponto do objeto contribuirão, após uma reflexão no espelho, para a formação de uma linha focal na direção axial. Estes raios também podem ser vistos como oriundos de uma linha de imagem virtual na seção transversal que contém o objeto. Como consequência a imagem observada irá apresentar um comportamento não-usual, pois quando o observador mover-se na direção axial a imagem acompanhará seu movimento [2,3].

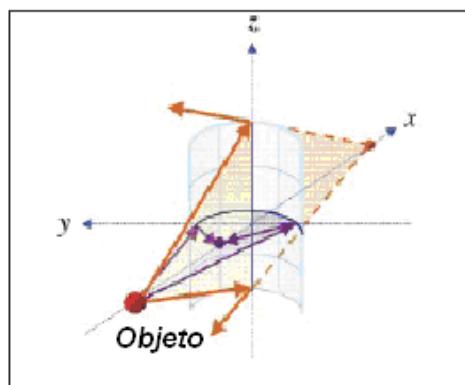


Fig. 2 – Formação de imagens por uma superfície refletora cilíndrica na direção axial.

Uma ampla discussão dos raios do objeto que convergem em “duas linhas de imagens”, em detrimento de um único ponto, é realizada na Ref. [2], na qual é detalhado que uma destas linhas é real enquanto a outra é virtual. Para um objeto no centro do cilindro, a linha de imagem real localiza-se ao longo deste eixo.

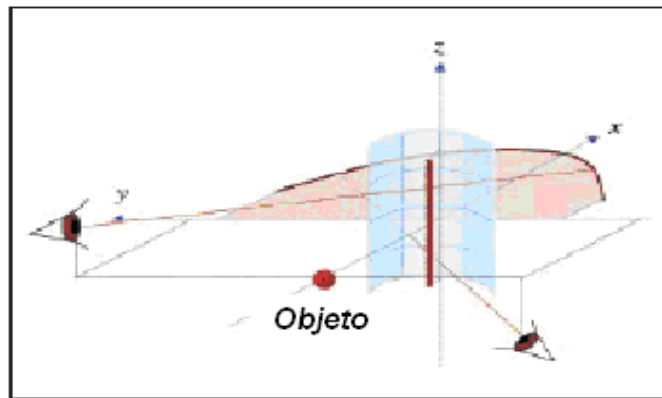


Fig. 3 – Formação de imagens por uma superfície refletora cilíndrica representando um contínuo de imagens nas posições observadas.

Se chamarmos o raio da secção transversal do cilindro de  $R$  e nos restringirmos aos pontos de imagem ao longo do eixo central, o comprimento focal da secção horizontal deste cilindro será  $R/2$ , como se ele se comportasse como um espelho esférico, a distância do objeto ao espelho é  $R$ , então a linha de imagem se distancia também de  $R$  com magnificação unitária. Nesse caso, a linha de imagem virtual será um círculo de raio  $2R$  no mesmo plano horizontal do objeto [4]. Um observador que passar através de ambas as linhas de imagem receberá ambos os raios, assim a imagem na direção axial parecerá que se move verticalmente, acompanhando o movimento do observador (Figs. 2 e 3). Quando a imagem é observada por ambos os olhos, se esses estiverem em uma direção transversa ao eixo do cilindro, atrás do espelho e paralelo ao mesmo, os eixos de convergência localizam a imagem próxima ao centro do cilindro. Quando iluminamos e incidimos um feixe de raios laser sobre a pseudo-imagem, a ilusão faz com que tenhamos a sensação de que o objeto está mesmo sendo iluminado. Este experimento também nos evidencia que somente uma reflexão, em espelhos cilíndricos, é envolvida para cada raio, como pode ser facilmente verificado quando incidimos o feixe de raios laser sobre a pseudo-imagem.

### ***3 – Lista de Materiais:***

#### *Formação de imagem em tubo de PVC com chapa de aço interna:*

1. Tubo rígido de PVC com 10 cm de diâmetro, 12 cm de comprimento e espessura aproximada de 4 mm;
2. Chapa de aço inoxidável espelhada, com as mesmas dimensões do tubo e 2 mm de espessura;

3. Objeto a ser depositado no fundo do tubo para ser refletido pelas paredes espelhadas: usarei bonecos ou animais em miniatura de fácil identificação pelo público;
4. Luminária comum para aumentar a nitidez da pseudo-imagem formada;
5. Caneta laser para realçar o efeito.

Formação de imagem em tubo de vidro com superfície interna metalizada:

1. Tubo de vidro com 10 cm de diâmetro, 12 cm de comprimento e espessura aproximada de 4 mm;
2. Metalização por tungstênio da parede interna do tubo de vidro a ser efetuada no laboratório didático de vácuo do IFGW;
3. Objeto a ser depositado no fundo do tubo para ser refletido pelas paredes espelhadas: usarei bonecos ou animais em miniatura de fácil identificação pelo público;
4. Parafuso regulável que servirá como plataforma para o objeto a ser depositado no interior do tubo espelhado, permitindo um ajuste da posição (altura) da pseudo-imagem formada;
5. Luminária comum para aumentar a nitidez da pseudo-imagem formada;
6. Caneta laser para realçar o efeito.

#### ***4 – Procedimentos Experimentais:***

Formação de imagem em tubo de PVC com chapa de aço interna:

As fotos apresentadas nas Figs. 4 a 7 mostram o padrão de imagens gerado pelo aparato proposto na primeira parte do experimento, ou seja, a formação de pseudo-imagem em tubo de PVC com chapa espelhada recobrimdo a superfície interna do tubo. A chapa foi doada pela empresa ISOLAN (situada na Avenida Santa Izabel, 30) que também forneceu serviço de corte e dobra, pois a manipulação sem acessórios apropriados poderia danificar a superfície, ou seja, provocar riscos, diminuindo a qualidade do fenômeno a ser observado.

A imagem gerada pela miniatura, representada na Fig. 7, é uma boa aproximação para uma imagem tridimensional real de um objeto que flutua, mas pequenas imperfeições na chapa espelhada alteraram levemente esta percepção. Por exemplo, a imagem não se apresenta com perfeita nitidez, encontrando-se levemente embaçada. Pode-se reduzir este efeito negativo sobre a qualidade da imagem aumentando-se a luminosidade incidente sobre o aparato.



Fig. 4 – Chapa de aço inox e tubo de PVC.



Fig. 5 – Chapa no interior do tubo, miniatura ao lado.



Fig. 6 – Vista superior da miniatura no interior do tubo.



Fig. 7 – Pseudo-imagem gerada pelo aparato.

*Formação de imagem em tubo de vidro com superfície interna metalizada:*

A configuração proposta nesta etapa do trabalho consistiu na evaporação de filamento de tungstênio no interior de uma superfície cilíndrica de vidro. Este tubo cilíndrico, após consulta ao técnico do laboratório didático de vácuo Sr. Carlos Salles Lambert, foi obtido através da vidraria da Unicamp, por meio de uma ordem de serviço a pedido do meu orientador Prof. Mário N. Tamashiro. O cilindro requerido possui as mesmas dimensões do tubo de PVC, ou seja, 10 cm de diâmetro, 12 cm de altura e espessura aproximada de 4 mm, composto de vidro comum usado basicamente em laboratórios de química para confecção de béquer, erlenmeyer ou tubos de ensaio. As fotos a seguir, Figs. 8 e 9, mostram o padrão de pseudo-imagens gerado nesta implementação através de cilindro de vidro metalizado:



Fig. 8 – Tubo de vidro metalizado tendo a seu lado miniatura sobre plataforma (parafuso ajustável) a ser inserida em seu interior.



Fig. 9 – Pseudo-imagem gerada com grande sensação de tridimensionalidade.

Comparando as Figs. 7 e 9, podemos agora perceber a grande diferença apresentada entre as pseudo-imagens dos dois métodos propostos neste trabalho, embora em ambos o objetivo proposto inicialmente tenha sido alcançado com êxito. Um observador externo consegue perceber claramente nas duas implementações a pseudo-imagem formada, mas obviamente com maior nitidez no segundo caso (vidro espelhado). Tendo em vista essa percepção clara de uma pseudo-imagem formada, o experimento proposto serve de forma eficaz como uma alternativa econômica ao dispositivo formador de imagens em espelhos

parabólicos conhecido como MIRAGE® [5,6], comercializado pela empresa Optigone. Este dispositivo consiste de duas lentes parabólicas colocadas face-a-face que formam uma imagem real no orifício na parte superior do aparato.

Uma tentativa de formação de pseudo-imagens através da construção de superfícies parabólicas já foi proposta anteriormente em disciplina correlata [7], obtendo êxito parcial. Tal experimento demonstra a relevância do assunto e nos forneceu motivação adicional para o prosseguimento deste trabalho.

## *5 – Dificuldades Encontradas:*

- A principal dificuldade encontrada na etapa inicial de trabalho consistiu em obter os materiais necessários para a construção das superfícies espelhadas.

- No primeiro método proposto – chapa curvada dentro de um tubo de PVC – consegui por meio de doação um pequeno pedaço de chapa de aço inoxidável, pois a aquisição da mesma era financeiramente inviável, além do que, a venda deste material se faz somente em grandes quantidades, estas armazenadas em bobinas industriais.

- No segundo método proposto – vidro metalizado – também a obtenção do material a ser utilizado se constituiu em uma dificuldade significativa: vidro e filamento de tungstênio, mas a grande ajuda dos técnicos do laboratório didático de vácuo e criogenia, Sr. Carlos Salles Lambert e Sr. Renato Lopes de Souza, resolveram este problema.

- Visto que a técnica empregada para a confecção de superfície espelhada por irradiação de filamento de tungstênio em câmara a vácuo requer equipamentos específicos, considero esse fato uma adicional dificuldade encontrada. Tivemos que realizar alguns testes de superfície, pois as primeiras irradiações geraram superfícies metalizadas foscas que prejudicariam a qualidade da observação do fenômeno.

- A formação da pseudo-imagem no primeiro método proposto sofreu perda de definição devido a pequenos riscos e imperfeições apresentadas na chapa metalizada, mas com uma boa iluminação incidente (fornecida através de uma luminária) o efeito de tridimensionalidade é reforçado, aumentando portanto, a sensação que o experimento visa proporcionar.



## 6 – Declarações do Orientador:

Meu orientador, o Prof. Mário N. Tamashiro concorda com o expressado neste relatório e emitiu as seguintes opiniões:

### 1-Declaração relativa ao relatório parcial:

**“Relatório aprovado. O aluno apresentou muita dedicação e iniciativa para encontrar os materiais necessários para a execução do experimento. Acredito que a segunda etapa do trabalho, com o tubo de vidro metalizado, será concretizada no prazo, tendo em vista que já foram realizados vários testes preliminares, bastando apenas obter uma metalização uniforme e sem partes foscas. O resultado, mesmo com o protótipo com partes foscas, foi de qualidade superior quando comparado com o tubo de PVC com chapa espelhada”.**

### 2-Declaração relativa ao relatório final:

**“Relatório aprovado. A segunda etapa do trabalho, com o tubo de vidro metalizado, foi concretizada com grande êxito. A imagem tridimensional formada por este método tem qualidade superior àquela obtida através de chapa metálica em tubo de PVC, sendo comparável ao produto comercial MIRAGE®, comercializado pela empresa Optigone”.**

## 7 – Pesquisa Realizada:

A pesquisa realizada na internet se constituiu basicamente em encontrar as referências citadas no artigo-base [4], que foi a inspiração para este presente trabalho. Utilizei para isso programas de busca com as seguintes palavras chave: “pseudo-imagem”, “espelho cilíndrico”, “formação de imagem”. No próximo item do relatório apresentamos um sumário dos tópicos discutidos em cada uma dessas referências.

## 8 – Sumário das Referências Citadas:

[1] – Z. Jaroszewicz, A. Burvall, A. T. Friberg, *Opt. Photon. News* **16**, 34–39 (Apr. 2005).

Este artigo especializado discute aspectos históricos e aplicações atuais do elemento óptico designado tecnicamente como *axicon*.

[2] – A. J. DeWeerd, S. E. Hill, *Phys. Teach.* **43**, 90–92 (Feb. 2005).

Este artigo trata basicamente da formação de imagem em espelhos de secção cilíndrica, primeiramente mostrando como os raios de um ponto-objeto refletem para formar não somente um ponto, mas sim duas linhas de imagem. Logo em seguida descreve como

um observador percebe a imagem de um objeto e no final do artigo nos relata o efeito da sensação de profundidade. O artigo contém também um apêndice no qual os autores nos mostram, através de um desenvolvimento matemático elementar, que a linha de imagem virtual formada por uma superfície cilíndrica se constitui em um segmento de uma curva denominada *limaçon de Pascal*. O cardióide representa um caso especial dessa classe de curvas, apresentando uma cúspide.

[3] – D. E. Thomas, *Sci. Am.* **12**, 158–171 (Dec. 1980).

Este artigo faz uma descrição das inversões de imagem em espelhos cilíndricos (côncavos e convexos), planos, espelhos com formatos de sela, toroidais e espelhos mistos, ou seja, que são formados por mais de uma classe de superfícies, suas peculiaridades de reflexão e projeção de convergência de raios em suas respectivas superfícies.

[4] – M. A. Caussat, H. Rabal, M. Muramatsu, *Phys. Teach.* **44**, 443–444 (Oct. 2006).

Este artigo foi a base para o experimento proposto na disciplina, com nossa sugestão adicional do tubo de vidro metalizado por irradiação em câmara de vácuo.

[5] – MIRAGE® - <http://www.optigone.com>.

Neste sítio eletrônico comercial encontram-se as descrições das características básicas do equipamento usado no laboratório de Física Básica-IV, para elucidar a formação de imagem em um ambiente peculiar, nesse caso, duas superfícies espelhadas em formato parabólico, com um ponto-objeto no formato inusitado de um porquinho, convergindo os raios na parte superior do dispositivo que contém um orifício, dando a sensação para um observador externo e que não tomou conhecimento do mesmo, que o objeto encontra-se realmente naquela posição, quando na verdade ele encontra-se no fundo, repousando na superfície parabólica inferior.

[6] – C. Ucke, *Phys. Unserer Zeit* **38**, 21–23 (Jan. 2007).

Neste artigo podemos encontrar fotos da versão comercial do MIRAGE®, bem como uma discussão da existência de uma segunda configuração dos espelhos parabólicos na qual há também a formação da pseudo-imagem tridimensional.

[7] – Leandro Aparecido Nogueira de Paula (orientador: Pedro Raggio), *Contribuição para a construção de espelhos parabólicos. Relatório de Instrumentação para o Ensino F-809, 1º semestre de 2006*, disponível através do link:

[http://www.ifi.unicamp.br/%7Elunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809/F809\\_sem1\\_2006/LeandroA\\_Raggio\\_RF1.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/%7Elunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2006/LeandroA_Raggio_RF1.pdf)

Este relatório, que pertence ao acervo eletrônico da disciplina F-809 (Instrumentação para o Ensino), descreve um método para a confecção da superfície parabólica para a formação de imagem de uma maneira análoga ao produto MIRAGE® [5,6], comercializado pela empresa Optigone, bem como uma discussão do problema associado conhecido como *balde de Newton*, com seu desenvolvimento matemático mais rigoroso, aspectos físicos intrínsecos, além de detalhamentos históricos da mecânica clássica à mecânica relacional.

## ***9 – Agradecimentos:***

Em especial para os técnicos dos laboratórios de vácuo, criogenia e óptica pela grande colaboração para a realização deste experimento: Sr. Carlos Salles Lambert, Sr. Renato Lopes de Souza e Sr. Antonio Carlos da Costa, respectivamente. Agradeço também a meu orientador nesta disciplina, Prof. Dr. Mário Noboru Tamashiro, e ao coordenador do curso, Prof. Dr. Jose Joaquín Lunazzi.