

# Relatório Final de Atividades

## Bolsa PIBIC

### Experiências de Ampère com Materiais de Baixo Custo

---

Aluno: Fabio Miguel de Matos Ravanelli, RA: 060553

E-mail: [famatos@ifi.unicamp.br](mailto:famatos@ifi.unicamp.br)

Bolsista desde Agosto de 2007

Orientador: Prof. Dr. André Koch Torres de Assis

E-mail: [assis@ifi.unicamp.br](mailto:assis@ifi.unicamp.br)

Home Page: <http://www.ifi.unicamp.br/~assis>

Dept. de Raios Cósmicos e Cronologia  
Instituto de Física, UNICAMP, Campinas, SP

Vigência: Agosto de 2007 a Julho de 2008

Bolsa não vinculada a projeto de pesquisa

Curso: Física

Área do projeto: 1.05.01.00-2 Física Geral

Bolsista cursando o quinto período, indo para o sexto  
O bolsista é detentor de bolsa de renovação do Pibic/CNPq

# Índice

**Introdução**

**Material Utilizado**

**Resultados Alcançados**

**Suporte e Contatos Elétricos**

**Experiência da Orientação de uma Espira Circular**

**Experiência da Espira de Inclinação**

**Experiência da Hélice de Ampère**

**Atração e Repulsão entre Condutores Retilíneos Paralelos**

**A Espira Astática**

**Interação entre Condutores Retos Fazendo um Ângulo entre Si**

**Atração e Repulsão entre um Ímã e um Condutor com Corrente**

**Caso de Equilíbrio do Fio Sinuoso**

**Caso de Equilíbrio das Correntes Antiparalelas**

**Caso de Equilíbrio da Não-Existência de Rotação Contínua**

**Produção Científica**

**Conclusão**

**Perspectivas de Continuidade do Projeto**

**Apoio a este Projeto**

**Agradecimentos**

**Bibliografia**

## *Introdução:*

André-Marie Ampère (1775-1836) foi um dos principais nomes do eletromagnetismo. James Clerk Maxwell, por exemplo, chamou-o de 'Newton da eletricidade,' [Max54, Vol. 2, parágrafo 528, pág. 175]. O principal resultado de suas pesquisas foi a obtenção de uma lei de força entre elementos de corrente com a qual conseguia descrever todas as experiências de interação entre condutores com corrente constante. Maxwell, no mesmo parágrafo e página citados acima, mencionou que esta fórmula de Ampère 'tem de sempre permanecer como a lei cardeal [mais importante] da eletrodinâmica.'

As pesquisas de Ampère para chegar em sua lei de força tiveram início em 1820, após a descoberta de H. C. Oersted (1777-1851) de que um ímã sofre um giro ou deflexão quando é colocado paralelo a um longo fio retilíneo conduzindo uma corrente constante. O trabalho original de Oersted já se encontra traduzido para o português, [Ørs86]. Como preparação para este projeto o bolsista estudou este trabalho e fez uma reprodução das experiências de Oersted com materiais de baixo custo seguindo o trabalho de Chaib e Assis, [CA07a].

Ampère interpretou esta experiência como sendo devida a uma interação direta entre condutores com corrente constante, supondo para isto a existência de correntes microscópicas no interior dos ímãs. Logo em seguida conseguiu mostrar que um fio em espiral conduzindo uma corrente constante era atraído ou repelido por um ímã cilíndrico, simulando assim a atração ou repulsão entre dois ímãs, dependendo da orientação de seus pólos magnéticos. Substituindo o ímã por um segundo fio em espiral com corrente constante, conseguiu mostrar a atração ou repulsão entre as duas espirais. O bolsista também estudou este trabalho e reproduziu esta experiência de Ampère com materiais de baixo custo, seguindo [SFCCA07] e [ASFCC07].

Isto levou Ampère a buscar uma interação entre longos fios retilíneos paralelos conduzindo correntes constantes. Ele teve sucesso nesta busca e mostrou que correntes de mesmo sentido se atraem e que correntes fluindo em sentidos opostos se repelem. Seus dois primeiros artigos descrevendo estas experiências, [Amp20a] e [Amp20b], já se encontram parcialmente traduzidos para o inglês, [Tri65]. O primeiro deles já se encontra totalmente traduzido para o português, [CA07b].

Para obter uma expressão matemática que expressasse a interação entre duas correntes nestes casos e em outros mais complicados, realizou uma série de experiências famosas. Seu principal trabalho contendo os resultados de seis anos de intensas pesquisas experimentais e teóricas foi publicado em 1827 com o título de "Teoria Matemática dos Fenômenos Eletrodinâmicos Deduzida Unicamente da Experiência." Foi publicado em forma de livro em [Amp90]. Há uma tradução parcial para o inglês desta principal obra de Ampère em [Tri65].

Para tornar a obra de Ampère mais conhecida para os estudantes brasileiros pretendemos neste projeto reproduzir algumas das experiências mais importantes que ele realizou, mas utilizando para isto materiais de baixo custo.

## *Material Utilizado*

Um dos nossos objetivos é possibilitar que estes experimentos possam ser reproduzidos por outros estudantes, divulgando assim a obra de Ampère. Por isto optou-se pelo uso de materiais de baixo custo.

Foram obtidos retalhos de madeira em uma fábrica de móveis. A madeira obtida consistiu basicamente de compensados de 15 mm de espessura, em pequenos pedaços, muitos dos quais em formatos regulares.

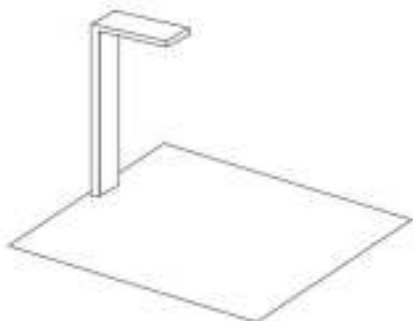
Para a realização destas experiências será necessário o uso de fio esmaltado, principalmente o AWG 20, e em alguns casos um fio mais fino, AWG 27. Este fio dificilmente pode ser substituído por outro material, pois o fio necessário para substituí-lo tem que ser isolado (isto é, encapado de modo a não permitir um contato elétrico entre dois fios em contato) e tem que ser leve. Tal fio não é vendido normalmente no comércio usual (apenas por distribuidoras especializadas). O fio somente foi obtido em uma oficina especializada em consertos de motores elétricos. No entanto, por tratar-se de uma quantidade ínfima de fio (de dois a cinco metros de fio por experiência, e considerando-se a quantidade de fio necessária para enrolar um motor elétrico) o mesmo foi obtido gratuitamente.

Serão usados também canudos de plástico (canudos de refrigerante) e uma fonte de corrente contínua (pilhas comuns, recarregador de celular). Tentou-se construir uma fonte de corrente mais adequada para os experimentos tratados aqui, proporcionando uma corrente elevada, superior a 10 A, utilizando-se uma fonte de computador. Mas tal montagem tornou-se inviável (esta adaptação requer conhecimentos mais elaborados de eletrônica, além do que para uma pequena resistência de carga, que é o caso destes experimentos, corre-se o risco de sobrecarregar a fonte, sendo que muitas destas fontes não são preparadas para isto, danificando-a). A intenção inicial era de possibilitar que uma ampla gama de estudantes pudessem realizar os experimentos. Pensando-se nesta dificuldade optou-se pela utilização de uma bateria automotiva, que proporciona uma corrente de 40 A com uma voltagem de 12 V. Pode-se obter uma bateria usada através de auto elétricas, oficinas de carros, lojas de som automotivo etc. Em alguns casos tal bateria pode ser obtida gratuitamente, sobretudo quando o estado desta inviabiliza o seu reaproveitamento, sendo então destinada a depósitos de sucata e a ferros-velho. Mesmo nestes casos tais baterias podem ser utilizadas nos experimentos aqui descritos, visto que estes permanecem ligados por pouco tempo e não requerem uma corrente precisa para operar.

Também serão utilizados materiais diversos como pedaços de papel alumínio, alguns ímãs permanentes, fita adesiva, prendedores de roupa, pregos, martelo, alicate, faca sem ponta e tesoura, todos de fácil obtenção.

## *Resultados Alcançados:*

### **Suporte e Contatos Elétricos:**



Com o intuito de possibilitar grande versatilidade na construção destes experimentos adotou-se alguns padrões na elaboração de alguns elementos comuns, como o suporte das experiências e a forma de proporcionar o contato elétrico entre muitas das peças móveis que demandam um pequeno atrito e boa liberdade para girar em um dado plano.

Para a construção dos suportes de modo geral utilizou-se muito a configuração mostrada na Figura. Tal montagem permite que uma espira possa girar livremente no plano horizontal ao redor de um eixo vertical. Com isto é possível detectar um torque decorrente dos fenômenos de atração e repulsão. O suporte consiste em uma base de madeira de dimensões aproximadas de 15 cm por 25 cm e um braço semelhante a um L invertido. O tamanho deste braço varia de experimento para experimento conforme as

intenções, desde suportar uma grande espira quanto permanecer próximo da base de madeira para verificar a interação entre um fio retilíneo preso a esta e uma espira astática.

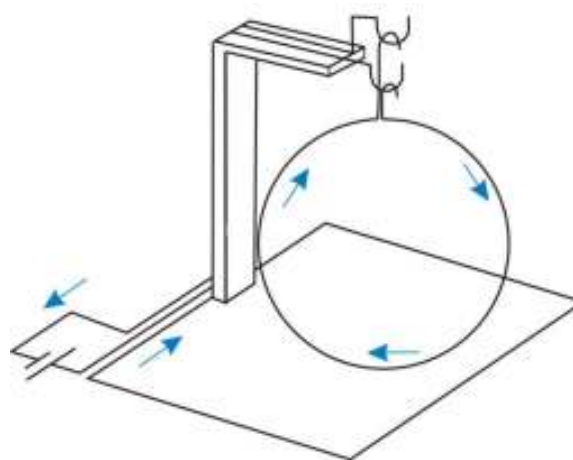
Para construir os experimentos descritos aqui não se faz necessário seguir a risca os materiais sugeridos. Por exemplo, a base de madeira sugerida pode ser substituída por uma de isopor sem prejuízo ao desenvolvimento dos experimentos. Os demais suportes para os experimentos serão apresentadas como variações deste suporte básico.

Os contatos elétricos foram feitos de modo a minimizar ao máximo o atrito, possibilitando assim que as espiras tenham plena liberdade para se movimentar. Os contatos basicamente consistem em um fio em forma de gancho que é encostado em uma base de papel alumínio na qual vai haver também um dos fios provenientes do suporte. Para facilitar ainda mais o contato pode-se adicionar uma gota de ácido fraco, ou até água salgada, na superfície do papel alumínio onde ocorrerá o contato.

Vamos agora descrever algumas das experiências que realizamos.

## Experiência da Orientação de uma Espira Circular

Ampère acreditava que os ímãs eram compostos de correntes elétricas microscópicas e que todos os fenômenos magnéticos eram devidos a interações entre correntes elétricas. Realizou uma experiência famosa na qual reproduziu a orientação de um ímã devida ao magnetismo terrestre, sendo que substituiu o ímã por uma grande espira circular com corrente. Quando orientada pelo magnetismo terrestre o plano vertical desta espira fica ortogonal à direção Norte-Sul magnética.



Conseguimos reproduzir esta experiência com a montagem mostrada na Figura. Para isto construímos uma espira circular com raio aproximado de 20 cm utilizando fio esmaltado AWG 27. Ele era leve o suficiente para ser orientado pelo magnetismo terrestre quando uma corrente fluía pela espira. Utilizamos um fio com aproximadamente 1,5 m de comprimento. As pontas foram torcidas e moldadas na forma de ganchos. O restante do fio foi moldado de forma aproximadamente circular (não é necessário que a espira tenha um formato circular perfeito). Desencapando-se as pontas do fio e colocando a espira em contato com os bornes do suporte fez-se o contato elétrico.

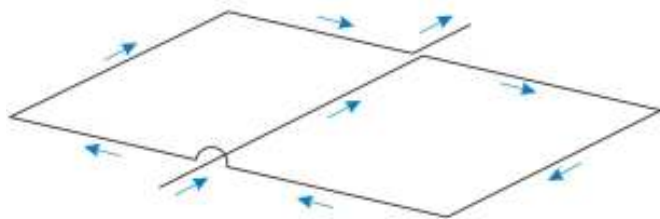
Este experimento necessita de uma pequena corrente para que possa ser visualizado. Podem ser utilizadas como fonte de corrente até mesmo pilhas comuns, sem grande dificuldade. Como pode ser observado na Figura, a corrente flui ao longo da espira

em um único sentido. No restante da montagem existem correntes iguais e opostas que se anulam.

## Experiência da Espira de Inclinação

Ampère também conseguiu reproduzir com correntes elétricas a orientação magnética de uma agulha de inclinação. Uma agulha de inclinação é a que pode girar no plano do meridiano magnético ao redor de um eixo horizontal perpendicular a este plano e passando pelo centro da agulha. No equilíbrio a agulha vai formar um ângulo com a horizontal chamado de ângulo de inclinação magnética.

Em nossa montagem, assim como na de Ampère, substituímos a agulha magnética por uma espira retangular que pode girar ao redor de um eixo horizontal que passa pelo centro da espira. A espira de inclinação pode ser utilizada para determinar a ação diretriz do magnetismo terrestre.



A montagem da espira e a direção da corrente podem ser acompanhadas na Figura. A espira é feita de um fio rígido capaz de suportar correntes elevadas. A corrente segue pelo eixo central de simetria, dá a volta em um dos lados do retângulo, segue pelo outro lado do retângulo, saindo então pela outra extremidade do eixo central. As pontas do fio foram desencapadas. A montagem foi tornada rígida com a utilização de fita adesiva. A espira retangular tem dimensões de 20 por 40 cm, formando dois quadrados de 20 cm de lado unidos por um eixo central horizontal que é fixo em relação à Terra. A espira tem liberdade para girar no plano vertical ao redor do eixo horizontal.

Para lograr êxito na realização deste experimento foi necessário impedir que as bordas da espira interagissem com o fio que leva corrente até a montagem. Isto foi feito trançando dois fios esmaltados no centro da base. No nosso caso utilizamos fios AWG 20, para aguentar uma corrente elevada. Esta trança se divide em seus fios originais, sendo que cada um destes é guiado para um dos postes onde ele faz contato com a espira de inclinação.

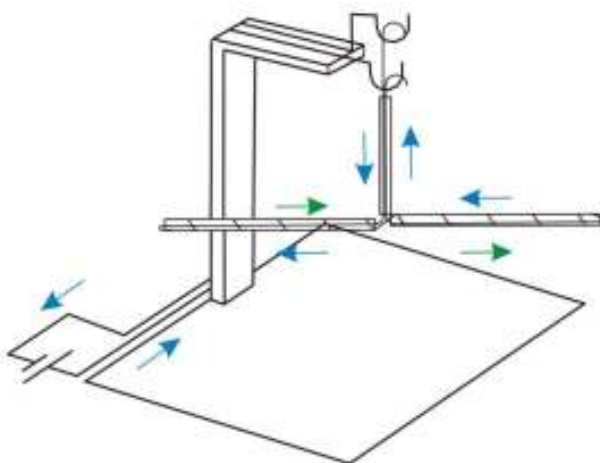
A espira é colocada no sentido Norte-Sul e podendo girar livremente neste plano vertical ao redor do eixo horizontal central. Inicialmente o plano da espira é horizontal. Ao passar corrente na espira observa-se que ela é defletida, com seu plano ficando inclinado em relação ao plano horizontal. O plano de equilíbrio da espira com corrente é ortogonal à direção de uma agulha imantada de inclinação. Algumas vezes a espira tende a dar mais de meia volta em torno do seu eixo para poder se orientar em relação ao magnetismo



terrestre. Para possibilitar este efeito é necessário elevar a altura dos postes centrais, tornando-os maiores que o braço da espira. Também pode-se virar a espira como um todo, dando meia volta no plano horizontal. Após algumas oscilações a espira retorna ao repouso, com seu plano permanecendo inclinado em relação ao plano horizontal enquanto flui uma corrente constante por ela.

## Experiência da Hélice de Ampère

Outra experiência realizada com pleno êxito foi a hélice de Ampère. A hélice consiste de dois segmentos cilíndricos dispostos horizontalmente e podendo girar livremente neste plano ao redor de um eixo vertical central. Uma corrente constante flui ao redor da hélice. Ao aproximar-se um ímã permanente de uma das extremidades da hélice, esta sofre um torque. Esta extremidade da hélice é atraída ou repelida pelo ímã conforme o sentido da corrente e o pólo do ímã. Ou seja, a hélice com corrente comporta-se como um longo ímã cilíndrico.

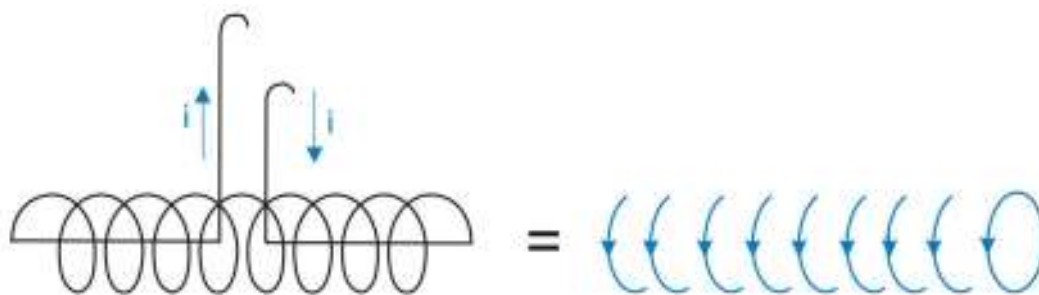


O circuito construído para este experimento é composto apenas por fios de pequena resistência. Utilizou-se como fonte de corrente contínua um recarregador de baterias de celular. No entanto, pode ser utilizado uma pilha comum de 1,5 Volts, ou uma associação em paralelo destas pilhas para possibilitar uma corrente mais elevada. O experimento em questão demanda uma pequena corrente para que possa ser observado o torque sobre a hélice. Uma única pilha AA já é suficiente para observar o fenômeno, o que torna-o amplamente acessível a qualquer estudante.

Para construir a hélice fizemos um pequeno corte em um canudo plástico a uns 10 cm de uma das extremidades, de modo a dobrar o canudo formando um L deitado. São colocados dois destes canudos cortados e deitados lado a lado, um deles com a parte menor para cima e o outro com a parte menor para baixo, com estas duas partes menores ao longo do eixo vertical central. As partes longas ficam ao longo de um mesmo eixo horizontal, como que refletidas ao redor do eixo vertical central. Pela ponta superior de menor comprimento do primeiro canudo desce um fio esmaltado (fino de preferência) que é guiado por dentro do canudo até a sua outra extremidade na ponta de maior comprimento horizontal. No fim desta o fio é enrolado ao canudo em forma de hélice, voltando até a junção do canudo (onde fez-se o corte). Deve-se continuar enrolando o fio ao redor da superfície externa do segundo canudo horizontal. O fio segue até a ponta horizontal do segundo canudo, voltando então por dentro deste até sua extremidade

menor, por onde desce. As pontas dos fios serão então desencapadas para possibilitar o contato elétrico com o circuito montado no suporte de madeira. Pode-se utilizar papel alumínio para melhorar tal contato.

Algumas variações ou modificações podem ser feitas ao experimento. Por exemplo, pode-se utilizar um único segmento vertical de canudo pelo qual a corrente vai subir e descer. Tal montagem possibilita anular a corrente como um todo no percurso vertical da hélice. Sobra então a contribuição da hélice que funciona como sendo composta de  $n$  espiras circulares de mesmo raio, com corrente fluindo em mesma direção e sentido, como mostrado na Figura. Ou seja, a hélice de Ampère funciona como um solenóide de corrente, reproduzindo assim o comportamento de um longo ímã cilíndrico.

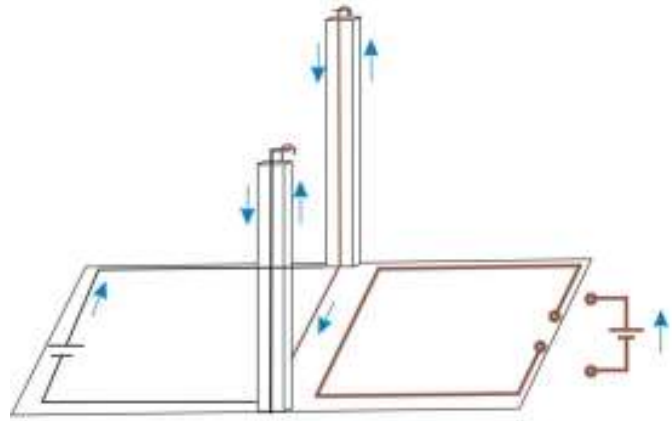


Tal modificação será crucial em várias experiências. Caso contrário haveria atração e repulsão entre esta componente vertical da corrente e outras partes dos experimentos, o que não é desejável.

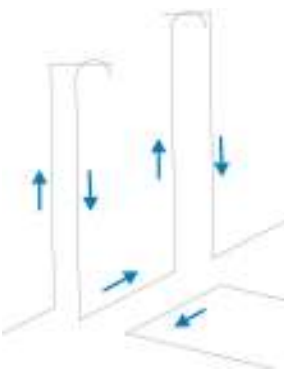
### **Atração e Repulsão entre Condutores Retilíneos Paralelos**

Conseguimos também reproduzir com sucesso outra importante experiência de Ampère com a qual se pode verificar a atração e repulsão entre condutores retilíneos e paralelos com corrente constante. Isto foi feito fixando-se um dos condutores no suporte e conferindo a um segundo condutor um grau de liberdade que o deixa livre para se mover. Este segundo condutor tem o formato da letra U. Ele fica em um plano vertical e pode girar ao redor de um eixo horizontal que liga as extremidades superiores do U. Com isto foi possível diminuir sensivelmente o atrito, que é uma das maiores dificuldades de realizar os experimentos aqui descritos. A parte horizontal do primeiro condutor, fixa no laboratório, é paralela à parte de baixo do segundo condutor em formato da letra U, ficando as duas na mesma altura. Assim foi possível a nítida percepção do fenômeno de atração e de repulsão. Quando a corrente nos fios retilíneos flui no mesmo sentido os fios se atraem. Quando ela flui em sentido contrário nos dois fios eles se repelem.



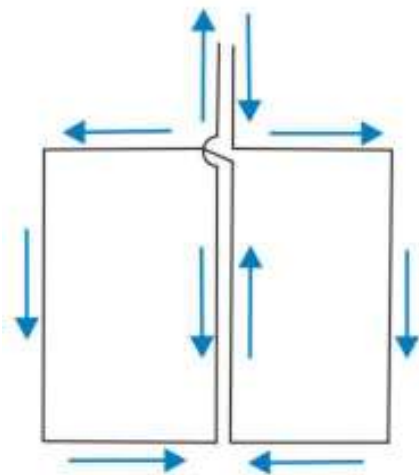


A corrente flui pelo fio que circunda os postes centrais da montagem, subindo por um dos postes, passando pelo circuito móvel em forma da letra U, e descendo pelo outro poste. O esquema com o sentido da corrente pode ser observado na Figura.



A corrente pode ser invertida em cada um dos ramos (invertendo-se os terminais da bateria ligados ao circuito). Para que o fenômeno possa ser observado é necessária uma corrente elevada. Nosso experimento foi executado por meio de uma bateria automotiva, fazendo com que fluísse perto de 20 A de corrente em cada um dos fios.

## A Espira Astática



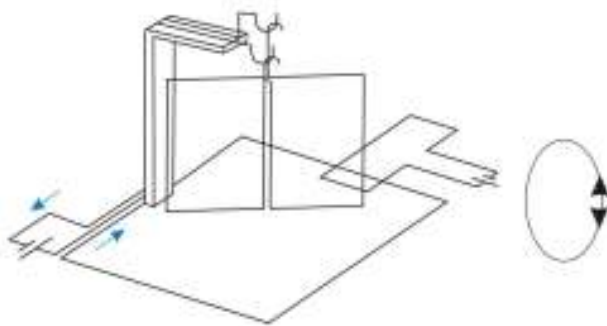
Já vimos que uma grande espira sofre um torque devido ao magnetismo terrestre, sendo orientada desta forma. Algumas vezes Ampère queria estudar a interação direta entre duas espiras com corrente, sem que houvesse a influência do magnetismo terrestre. Para isto construiu aquilo que denominou de “espira astática,” ou seja, uma espira com corrente que não é influenciada pela Terra, sendo indiferente ao magnetismo terrestre. A espira astática decorre da junção de duas espiras colocadas lado a lado com a corrente em sentido contrário uma da outra, como na Figura.

A espira astática que construímos foi feita de fio esmaltado. Deu-se preferência pela utilização de um fio de espessura intermediária. Um fio muito grosso fica com uma inércia muito grande, dificultando as observações. Já um fio muito fino é facilmente deformável, o que também não é desejável. A espira que construímos tem um tamanho de 25 por 30 cm.

Dobrou-se um fio de aproximadamente 2 metros de comprimento de modo a obter o esquema da Figura. Para manter a forma da montagem utilizou-se pequenos pedaços de fita adesiva para fixar os fios centrais. As pontas dos fios foram novamente desencapadas e dobradas em forma de gancho para permitir a inserção desta espira na montagem experimental. A espira fica em um plano vertical podendo girar ao redor de seu eixo central de simetria.

## Interação entre Condutores Retos Fazendo um Ângulo entre Si

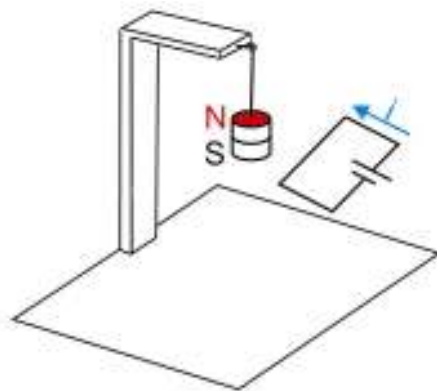
Uma das experiências que Ampère realizou com a espira astática e que conseguimos reproduzir com materiais de baixo custo foi a de interação entre dois condutores retilíneos que fazem um ângulo entre si. Podemos imaginar o primeiro deles centrado na origem, direcionado ao longo do eixo z e com corrente na direção z positiva. O segundo está centrado em  $(x, y, z) = (x_0, 0, 0)$  e pode girar no plano yz ao redor do eixo x, mantendo fixo seu centro em  $x_0$ . Quando o segundo condutor reto está ao longo do eixo z com corrente na direção z positiva, o ângulo entre os dois condutores é nulo. Quando o segundo condutor está ao longo do eixo y, o ângulo entre eles é de  $90^\circ$ . E quando ele está ao longo do eixo z com corrente na direção z negativa, o ângulo entre eles é de  $180^\circ$ .



afastando do condutor reto.

A atração é máxima quando os condutores com corrente estão paralelos e a corrente flui no mesmo sentido. Se os condutores estão perpendiculares entre si então não há atração ou repulsão. E a repulsão máxima ocorre quando os condutores estão paralelos e a corrente flui em sentidos opostos. Esta atração ou repulsão é observada pela deflexão da espira astática se aproximando ou se

## Atração e Repulsão entre um Ímã e um Fio com Corrente



Também realizamos uma experiência feita originalmente por Ampère mostrando a atração e repulsão entre um fio com corrente e um ímã permanente. Para este experimento utilizou-se um pequeno ímã cilíndrico com os pólos Norte-Sul alinhados na vertical e suspenso na extremidade de um fio de lã. O fio era preso ao centro da extremidade superior do ímã com um pouco de massa de modelar. Ao aproximar o fio com corrente do ímã, este é atraído ou repelido conforme o sentido da corrente. Invertendo-se a corrente passa-se ao efeito contrário.

Embora a primeira vista este experimento possa parecer trivial, este não é o caso. Esta foi a primeira experiência mostrando diretamente uma atração e repulsão entre um fio com corrente e um ímã. Ampère realizou esta experiência em 1820. Até então só se conhecia a experiência de Oersted que mostrou um torque sofrido por uma agulha imantada na presença de um fio com corrente.

O experimento pode ser realizado com um fio retilíneo com corrente constante proveniente de uma pilha fixada no mesmo suporte que o fio. Não é necessária uma corrente elevada para observar a atração e repulsão nesta experiência.

## Caso de Equilíbrio do Fio Sinuoso

Uma das principais contribuições de Ampère para a ciência experimental foi sua criação do que chamou de “casos de equilíbrio” e as conseqüências teóricas que

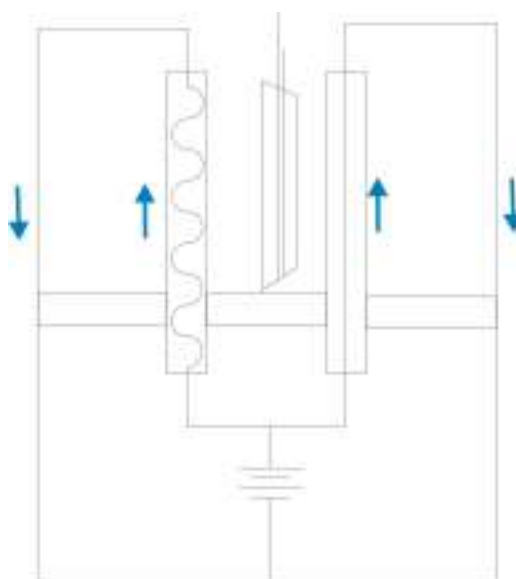
conseguiu obter destas experiências, [Amp90, págs. 185-199]. Tais experimentos também receberam o nome de “método de zero” [Max54, Vol. 2, artigo 503, pág. 159].

Palavras de Ampère descrevendo o método, [Amp22c]: “Mas existe uma outra maneira de alcançar mais diretamente o mesmo objetivo. Foi esta maneira que segui desde então e que me conduziu aos resultados que desejava. Ela consiste em constatar, pela experiência, que as partes móveis dos condutores permanecem, em certos casos, exatamente em equilíbrio entre forças iguais, ou entre torques iguais, qualquer que seja além disto a forma da parte móvel, e de procurar diretamente, com a ajuda do cálculo, qual que deve ser o valor da ação mútua entre duas porções infinitamente pequenas, para que o equilíbrio seja efetivamente independente da forma da parte móvel.” Ou seja, temos um condutor móvel *A*. Ele fica sob a ação oposta de dois outros condutores *B* e *C*. Ampère busca situações de equilíbrio não triviais tais que as ações conjuntas de *B* e de *C* sobre *A* se anulem. A partir desta observação experimental e de análise matemática conseguiu obter várias conseqüências importantes sobre como deve se comportar a força entre elementos de corrente (cair com o quadrado da distância, como deve ser o comportamento angular etc.).

Trataremos aqui de três casos de equilíbrio de Ampère. Todos os casos utilizam uma espira astática com corrente constante. Faz-se necessário a utilização de uma corrente elevada nestes experimentos, sendo indispensável a utilização de uma bateria automotiva.

O primeiro experimento é chamado de caso de equilíbrio do fio sinuoso. O mesmo pretende corroborar a lei de adição de Ampère de acordo com a qual a força exercida por um elemento de corrente sobre um segundo elemento de corrente tem o mesmo valor que a soma das forças exercidas sobre o segundo elemento de corrente pelas decomposições vetoriais do primeiro elemento.

Na experiência colocam-se dois condutores verticais em lados opostos de uma espira astática. Passa-se uma corrente de mesma intensidade nos dois condutores. Os dois repelem a espira astática. Quando eles estão a distâncias diferentes da espira astática esta sofre um torque, girando ao redor de um eixo vertical. O objetivo principal da experiência é observar que eles não ocasionam uma deflexão na espira astática quando estão a iguais distâncias dela, mesmo se um dos condutores for sinuoso, com a corrente seguindo em zigue-zague. Isto comprova a lei de adição de Ampère



Para tornar isto possível construiu-se uma montagem com um poste em torno de 40 cm de altura, para possibilitar uma melhor elaboração do experimento. Foi construída uma plataforma no formato da letra T com altura de aproximadamente 10 cm e grandes braços laterais, em torno de 15 cm cada um. Foram colocados duas hastes verticais de 20 cm nesta plataforma. Estas hastes têm a liberdade de andar ao longo da horizontal desta plataforma. Nas pontas da mesma há hastes fixas de igual tamanho que as hastes móveis.

Pode-se visualizar a solução empregada para tornar o braço móvel na Figura abaixo. Estes braços são encaixados no T deformado, podendo se deslocar ao longo deste.



Construiu-se o referido braço fazendo-se um U com três pequenos pedaços de madeira colados ou pregados a um outro pedaço de madeira de 20 cm de comprimento. É importante que o U seja feito com madeiras um pouco mais espessas, caso se opte por pregá-las. Se a madeira for muito fina o prego por menor que seja pode quebrar a madeira.

A corrente em ambos os braços deve ser igual e deve ter o mesmo sentido (tomados os dois braços mais ao centro). Para a construção dos mesmos será necessário 1 metro de fio esmaltado AWG 20 para cada braço. A utilização de um fio mais grosso é recomendado para suportar uma corrente elevada como ocorrerá no experimento devido a utilização da bateria automotiva. Deve-se utilizar a mesma quantidade de fio em cada braço para que estes tenham igual resistência elétrica, assegurando que flui uma mesma corrente em cada braço. Os fios dos braços serão ligados em paralelo diretamente na bateria.

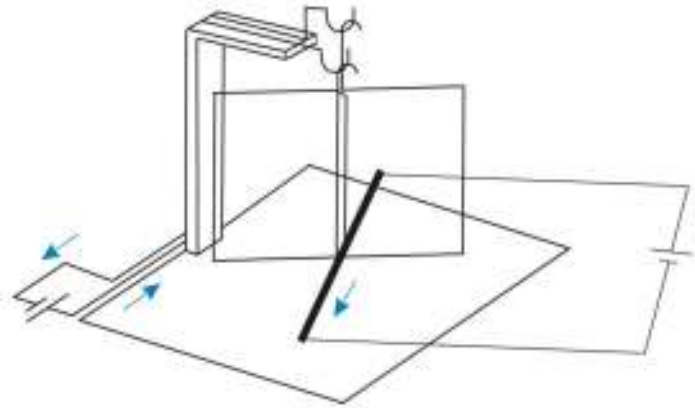
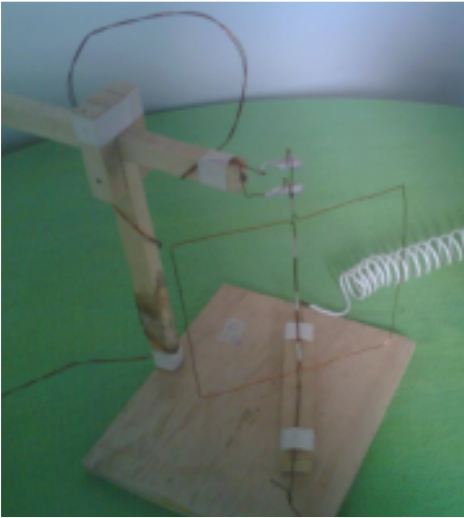
Quando os braços estão a iguais distâncias da espira astática, esta permanece em repouso qualquer que seja a posição inicial desta. Se os braços não estão a uma posição equidistante da espira, então esta sofre um torque indicando assim que não há equilíbrio no sistema.

## **Caso de Equilíbrio das Correntes Antiparalelas**

Mais uma vez o experimento consiste em uma espira astática livre para girar no plano horizontal ao redor de seu eixo de simetria vertical. Coloca-se um fio retilíneo com corrente passando abaixo da espira e bem no centro desta (a projeção do eixo central da espira coincidindo com o centro do fio reto). Observa-se que para um ângulo qualquer entre o fio retilíneo e o plano da espira astática, a espira permanece em repouso. Ou seja, o fio reto com corrente não exerce torque sobre a espira astática. Tal experimento foi utilizado por Ampère para provar que tanto a atração quanto a repulsão têm mesmo valor absoluto.

Em nossa reprodução desta experiência um fio rígido foi desencapado nas pontas e fixado em uma pequena madeira com dimensões de 15 cm por 2 cm de largura e fixada com um prego central na base do suporte. Para podermos ajustar a posição da espira em relação ao fio, modificou-se o poste da montagem usual para conferir a ele um movimento horizontal. Para este experimento também utilizou-se como fonte de corrente a bateria

automotiva por ser necessária uma corrente elevada para poder visualizar mais facilmente o fenômeno.



Quando a projeção vertical do centro da espira astática coincide com o centro do fio, a espira astática permanece em repouso qualquer que seja o ângulo entre o fio reto e o plano da espira. Isto significa que é nulo o torque resultante sobre a espira astática. Contudo, se a projeção do eixo da espira não passa pelo centro do fio, então a espira sofre um torque girando de um certo ângulo em relação à sua posição original.

Uma das dificuldades com os experimentos conhecidos como casos de equilíbrio de Ampère é mostrar ao espectador que o equilíbrio é uma situação especial e não um acontecimento fortuito. A espira astática vai ficar em repouso caso não flua corrente por alguma parte do circuito (devido a algum mal contato, por exemplo) ou caso exista um grande atrito atuando sobre a espira. Para evitar estes problemas é necessário em primeiro lugar mostrar que quando não há uma simetria apropriada, vai ocorrer um torque visível sobre a espira astática. Isto comprova que a corrente está fluindo por todo o sistema e que o atrito sobre a espira é pequeno o suficiente tal que permite que ela gire. Somente depois disto deve-se colocar o sistema com a simetria apropriada tal que dois torques iguais e opostos se cancelem exatamente. Neste último caso a espira não gira, qualquer que seja sua orientação inicial.

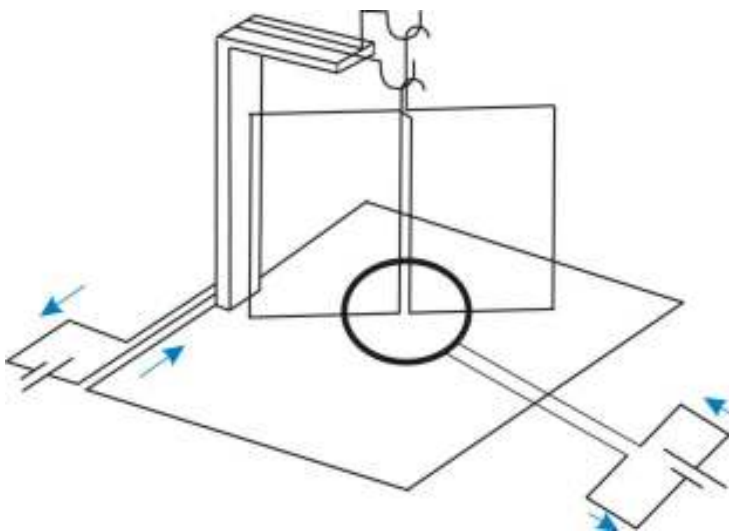
Na montagem ilustrada na foto e na Figura utilizamos o padrão usual do suporte para mostrar o experimento. O fio retilíneo (ênfatisado em **negrito** na Figura) pode ser colocado em ângulos diferentes em relação ao plano da espira. O centro do fio reto pode ou não coincidir com a projeção do eixo vertical da espira astática. Mostra-se assim que a situação de equilíbrio ocorre somente quando o fio passa na projeção do eixo da espira, qualquer que seja o ângulo entre o fio reto e o plano da espira.

### **Caso de Equilíbrio da Não-Existência de Rotação Contínua**

Outra experiência importante de Ampère é o denominado caso de equilíbrio da não existência de rotação contínua. Foi com esta experiência que Ampère obteve a expressão final de sua lei de força entre elementos de corrente. Maxwell afirma que esta lei deveria permanecer sempre como a fórmula cardinal [mais importante] da eletrodinâmica, [Max54, Vol. 2, parágrafo 528, p. 175]. A experiência consiste em colocar uma espira astática em um plano vertical. Abaixo dela coloca-se uma espira circular horizontal. Caso a projeção do eixo vertical da espira astática não coincida com o centro da espira circular, pode haver um torque sobre a espira astática. Por outro lado, caso a projeção do eixo vertical



da espira astática coincida com o centro da espira circular, não vai haver torque resultante sobre a espira astática, qualquer que seja o ângulo entre o plano desta espira astática e a direção Norte-Sul. Se a espira horizontal não for circular, também vai haver um torque sobre a espira astática.



Ampère chama este experimento de um “fato novo” no seu artigo de 1822, [Amp22c]: “Este fato pode ser enunciado assim: Um circuito circular fechado não pode jamais produzir movimento contínuo sempre no mesmo sentido, ao agir sobre um condutor móvel de uma forma arbitrária que parte de um ponto ao longo da perpendicular elevada sobre o plano deste circuito pelo centro do círculo do qual ele forma a circunferência e que termina em outro ponto do mesmo eixo, enquanto que o condutor móvel só pode se mover girando ao redor deste eixo.”

Em nossa reprodução desta experiência crucial de Ampère utilizamos um tubo de PVC cilíndrico como molde para fazer as espiras circulares. Enrolou-se aproximadamente 5 metros de fio ao longo do tubo, fixando a espira com fita adesiva, sendo dadas aproximadamente 15 voltas de fio em torno do tubo. Juntou-se e trançou-se uma porção de aproximadamente 15 cm de fio de cada uma das extremidades. As pontas dos fios foram desencapadas e distanciadas alguns centímetros, sendo então ligadas a uma fonte de corrente contínua.

Observamos que a espira astática com corrente não sofre nenhum torque, independente do valor da corrente que passa pela espira circular fechada.

Antes de realizar esta experiência é importante aproximar um ímã permanente da espira astática. Isto quebra a situação de equilíbrio, produzindo um torque na espira astática que pode ser facilmente observado. Somente após percebermos que há corrente na espira astática e que o atrito sobre ela é pequeno o suficiente (como percebido pelo torque exercido sobre ela pelo ímã permanente), é que se deve realizar a experiência da não existência de rotação contínua.

### *Produção Científica:*

Durante o período da Bolsa de Iniciação Científica submetemos para publicação dois artigos com nosso orientador. Um artigo em português discutindo o conceito do centro de gravidade nos livros didáticos e um artigo em inglês sobre as conseqüências de uma lei generalizada da alavanca. Estes artigos referem-se a trabalhos realizados anteriormente a esta Bolsa.



O aluno teve um trabalho aceito para apresentação na forma de painel na 60ª Reunião Anual da SBPC que ocorrerá na UNICAMP de 13 a 18 de julho de 2008. Título do trabalho a ser apresentado: Experiências de Ampère com Materiais de Baixo Custo.

### *Conclusão:*

Realizamos com sucesso a reprodução de diversas experiências de Ampère com materiais de baixo custo. Conseguimos reproduzir uma quantidade bem maior de experiências do que imaginávamos inicialmente. O que apresentamos aqui foi a forma final em que estas experiências foram bem sucedidas. Mas até chegar a este ponto fizemos uma série de tentativas, muitas das quais fracassadas. Elas levaram a modificações de nossos projetos e foram muito instrutivas. As modificações que deram certo se perpetuaram nos demais experimentos.

### *Perspectivas de Continuidade do Projeto:*

Foi produzido uma grande quantidade de material relatando como proceder a realização destes experimentos. Em decorrência disto, pretende-se elaborar um texto contendo todas as informações relevantes à realização destas experiências. Tal projeto de pesquisa foi submetido ao Pibic/Unicamp, sendo aprovada uma nova Iniciação Científica que dará continuidade a este projeto com uma Bolsa do CNPq. Título do novo projeto: Redação de um Texto sobre as Experiências de Ampère com Materiais de Baixo Custo.

### *Apoio a este Projeto:*

PIBIC.

### *Agradecimentos:*

Agradecemos ao Prof. Dr. José Joaquim Lunazzi do Instituto de Física da UNICAMP pelo apoio ao recarregar baterias e por sugestões relativas a estas experiências.

## Bibliografia:

[Amp20a] A. M. Ampère. Mémoire présenté à l'Académie royale des Sciences, le 2 octobre 1820, où se trouve compris le résumé de ce qui avait été lu à la même Académie les 18 et 25 septembre 1820, sur les effets des courans électriques. *Ann. Chim. Phys.* **15**: 59-76, 1820. Disponível em: <http://www.ampere.cnrs.fr/>

[Amp20b] A. M. Ampère. Suite du Mémoire sur l' Action mutuelle entre deux courans électriques, entre un courant électrique et un aimant ou le globe terrestre, et entre deux aimants. *Ann. Chim. Phys.* **15**: 170-218, 1820. Disponível em: <http://www.ampere.cnrs.fr/>

[Amp22c] A. M. Ampère. Mémoire sur la determination de la formule qui represente l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de conducteurs voltaïques. Lu à l'Académie royale des Sciences, dans la séance du 10 juin 1822. *Ann. Chim. Phys.* **20**: 398-421, 1822.

[Amp90] A. M. Ampère. *Théorie Mathématique des Phénomènes Électrodynamiques Uniquement Déduite de l'Expérience*. Éditions Jacques Gabay, Sceaux, 1990.

[ASFCC07] A. K. T. Assis, M. P. Souza Filho, J. J. Caluzi e J. P. M. C. Chaib, From electromagnetism to electrodynamics: Ampère's demonstration of the interaction between current carrying wires. In: Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Hands-on Science (University of Azores, Ponta Delgada, 2007), pp. 9-16.

[CA07a] J. P. M. C. Chaib e A. K. T. Assis, Experiência de Oersted em sala de aula, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **29**: 41-51 (2007).

[CA07b] J. P. M. d. C. Chaib e A. K. T. Assis, Sobre os efeitos das correntes elétricas – tradução comentada da primeira obra de Ampère sobre eletrodinâmica, *Rev. Soc. Bras. Hist. Ci.* **5**: 85-102 (2007).

[Max54] J. C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Dover, New York, 1954.

[Ørs86] H. C. Ørsted. Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética. *Cad. Hist. Fil. Ci.* **10**: 115-122, 1986. Tradução de Roberto de A. Martins.

[SFCCA07] M. P. Souza Filho, J. P. M. C. Chaib, J. J. Caluzi e A. K. T. Assis, Demonstração didática da interação entre correntes elétricas, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **29**: 605-612 (2007).

[Tri65] R. A. R. Tricker, *Early Electrodynamics – The First Law of Circulation*. Oxford: Pergamon Press, 1965.