
A FÍSICA UTILIZADA NA INVESTIGAÇÃO DE ACIDENTES DE TRÂNSITO¹

Ana Alzira Kleer

Marcelo Resende Thielo

Arion de Castro Kurtz dos Santos

Depto de Física - UFRG

Rio Grande - RS

Resumo

Visando o ensino de Física de uma maneira mais atrativa aos alunos de 2° e 3° graus, desenvolvemos um programa que permite utilizar alguns tópicos de Mecânica na Investigação de Acidentes de Trânsito. Como precisávamos conhecer o coeficiente de atrito, construímos um aparelho para tal e, utilizando dados a respeito de marcas de derrapagem, coeficientes de atrito para diferentes pontos, raios de curvas, etc. colhidos na BR-392 que liga as cidades de Rio Grande e Pelotas, pudemos testar o programa e, com o auxílio de bibliografia adequada, verificar a validade de nossas estimativas. Os resultados obtidos mostram que o programa IAT pode ser utilizado por estudantes e professores de Física, bem como por investigadores de trânsito, possibilitando o aprendizado da Física e auxiliando nas investigações de acidentes e na conscientização em relação à segurança no trânsito.

I. Introdução

Todos concordam que o ensino de Física na escola secundária deve enfatizar a Física do cotidiano. Acredita-se que isso traria relevância à Física, aumentando a motivação do estudante e facilitando o aprendizado.

Uma investigação de um acidente de trânsito, conduzida por profissionais, aplica extensivamente os princípios da Mecânica, com o objetivo de inferir sobre as

¹Projeto do Departamento de Física da FURG financiado pela CAPES, CNPq e FAPERGS.

causas do acidente. Os princípios da Mecânica utilizados numa investigação são vistos nos cursos de Física de 2º grau e as técnicas de investigação utilizadas são interessantes e podem, facilmente, ser entendidas pelos estudantes secundaristas. Além disso, existem algumas vantagens pedagógicas do uso desse tópico como um tema de desenvolvimento de conteúdo no ensino e aprendizagem de Mecânica:

a) evidencia a relevância da Física e mostra como esta pode ser aplicada para resolver problemas práticos da vida real;

b) fornece ótimos exercícios de problemas que permitem diferentes métodos de resolução;

c) fornece exercícios de testagem de hipóteses, por exemplo, declaração de testemunhas;

d) promove a consciência acerca de questionamentos científicos sobre problemas da vida real que necessitam ser complementados, por exemplo, por considerações legais e morais e

e) reforça a importância da segurança nas estradas, evidenciando as vantagens do uso do cinto de segurança e da obediência às leis do trânsito.

II. Fundamentação Teórica

Os princípios básicos da Mecânica utilizados na reconstituição de um acidente incluem:

a) atrito;

b) aceleração constante;

c) Leis de Newton;

d) conservação do Momento Linear;

e) movimento circular e

f) movimento de projéteis.

Coefficiente de atrito

Uma investigação quantitativa mostra que, em módulo, o atrito F_a é aproximada e diretamente proporcional à força normal de reação N . Numa superfície nivelada, a reação normal é igual ao peso P de um objeto. A razão entre o atrito e a normal é constante e depende somente da natureza das superfícies de contato. Essa constante é chamada de **coeficiente de atrito** μ , isto é, $\mu = \frac{F_a}{N}$ ou $F_a = \mu N$. Seu valor

é usualmente menor do que 1. O valor de μ entre o pneu e a superfície da estrada é o valor chave na investigação dos acidentes.

Atrito dos pneus com a estrada

Para desacelerar ou parar o carro, aplicamos os freios. Numa parada de emergência, tendemos a aplicar os freios fortemente. Para sistemas convencionais (não ABS), as rodas são trancadas e impedidas de girar. Como resultado, o carro derrapa e desacelera. A força de desaceleração é, na verdade, o atrito de escorregamento. Nesse caso, é um empurrão para trás do solo sobre os pneus. Numa estrada nivelada, essa força é igual ao produto do coeficiente de atrito dos pneus com a estrada μ e o peso mg do carro, isto é, $F = \mu mg$, onde m é a massa do carro e g é a aceleração devido à gravidade.

Numa rodovia seca, não lubrificada, o valor de μ depende somente da natureza da superfície dos pneus e da estrada. Ele é independente do peso do veículo e das condições dos pneus (isto é, pressão, padrão da banda de rodagem e profundidade, por exemplo). O valor de μ muda muito pouco com a velocidade. Seu valor é menor para velocidades altas, mas pode ser considerado constante para velocidades dentro do intervalo de 40 a 120 kmh^{-1} . Contudo, se a superfície da estrada estiver molhada, a situação se torna muito complicada. Nesse caso, o valor de μ dependerá significativamente das condições do pneu, da velocidade, do peso do veículo e do grau de umidade.

As superfícies das estradas podem ser de natureza e grau de rigidez distintos (asfalto, concreto e terra, por exemplo). O valor de μ varia em torno de 0.4 (para superfícies polidas) a 1 ou mesmo mais (para superfícies secas e rígidas). Numa superfície congelada, o valor de μ pode ser tão baixo quanto 0.1.

Como estimar a velocidade a partir das marcas de derrapagem

Marcas de derrapagem (veja figura 1) são comumente encontradas em estradas onde o trânsito é intenso.

Suponhamos que um veículo de massa m viaja numa estrada nivelada com uma velocidade u antes de derrapar. A energia cinética E_C do veículo é dada por:

$$E_C = \frac{1}{2} m u^2$$

Após derrapar uma distância d , o veículo pára. A força responsável pela desaceleração é o atrito dos pneus com a estrada e é dada por:

$$F = \mu mg,$$

onde g é a aceleração da gravidade.

O trabalho realizado contra a força de atrito é:

$$W = Fd = \mu mgd.$$

Quando o carro pára, sua energia cinética é reduzida para zero. A variação da energia cinética é igual ao trabalho feito contra a força de atrito, isto é,

$$\frac{1}{2} m u^2 = \mu m g d, \text{ logo}$$

$$d = \frac{u^2}{2\mu g} \quad \text{ou}$$

$$\boxed{u = \sqrt{2\mu g d}}$$

Essa fórmula mostra que a distância de parada após a derrapagem depende somente do coeficiente de atrito μ e da velocidade u antes da derrapagem. Ela é independente da massa do veículo. Nessa demonstração, estamos assumindo que os freios estejam funcionando adequadamente e que as rodas tenham sido trancadas ao mesmo tempo.

A fórmula acima fornece a velocidade do veículo no início da derrapagem, mas não no momento em que os freios são aplicados. Quando os freios são pressionados fortemente, há uma intensa desaceleração num intervalo muito curto de tempo, antes das rodas serem trancadas e a derrapagem começar. A velocidade inicial antes da derrapagem não pode ser descoberta. Assim, a fórmula fornece somente o valor mínimo da velocidade antes da derrapagem.



Fig. 1 - Marcas de derrapagem encontradas na BR 392 que liga as cidades de Rio Grande e Pelotas.

Derrapagem para uma velocidade conhecida

No caso onde um veículo colida com outro, ou bata num objeto fixo, após uma derrapagem por alguma distância, a velocidade u no começo da derrapagem pode

ser estimada se a velocidade de impacto v for conhecida. A velocidade de impacto pode ser estimada a partir do estrago no veículo, ou pela aplicação do Princípio de Conservação do Momento Linear.

Um veículo desacelera ao derrapar. A força desaceleradora é dada por $F = -\mu mg$, onde m é a massa do veículo e g a aceleração devido à gravidade. O sinal negativo indica que a direção do atrito é oposta à direção do movimento.

Se a desaceleração média durante a derrapagem é a , então

$$F = ma = -\mu mg \text{ (pela segunda lei de Newton)}$$

$$\text{logo, } a = -\mu g.$$

Aplicando a equação do movimento com aceleração constante,

$$v^2 - u^2 = 2ad.$$

Na substituição, encontramos

$$v^2 - u^2 = -2\mu gd$$

e, finalmente,

$$u = \sqrt{v^2 + 2mgd}.$$

Aparelho para estimar μ

Como precisávamos conhecer o coeficiente de atrito dos pneus com a estrada, construímos um aparelho para tal e, utilizando dados colhidos na BR-392 que liga as cidades de Rio Grande e Pelotas, pudemos testá-lo.



Fig. 2 - Arrastando o aparelho para medir o coeficiente de atrito.



Fig. 3 - Verificando o peso do aparelho.

Esse aparelho consiste de 3 secções de pneus fixas numa tábua (veja Fig. 2). O aparelho é puxado com uma força horizontal (medida com uma balança de molas) de tal modo que derrape com velocidade constante sobre a superfície requerida.

O coeficiente de atrito é dado por
$$\mu = \frac{\text{força aplicada}}{\text{peso do aparelho}},$$

onde o *peso do aparelho* é obtido utilizando-se o próprio aparelho seguro na vertical (veja Fig. 3).

Desaceleração na derrapagem e freada

Numa derrapagem, a desaceleração a de um veículo é dada por $a = -\mu g$, onde μ é o coeficiente de atrito dos pneus com a estrada e g a aceleração da gravidade. Rearranjando, podemos escrever

$$\mu = -\frac{a}{g}$$

Logo, o valor de μ pode ser considerado como a fração decimal da aceleração da gravidade g . Por exemplo, um valor de μ igual a 0.7 pode ser considerado como uma aceleração de $0.7g$ (o que significa que a força de atrito é 0.7 vezes o peso do veículo).

Dado que

u = velocidade inicial v = velocidade final a = aceleração

t = tempo gasto d = distância percorrida,

substituindo a por $-\mu g$, as conhecidas equações para o movimento acelerado poderão ser escritas como

$$v = u - \mu g t$$

$$d = ut - \frac{1}{2} \mu g t^2$$

$$v^2 = u^2 - 2\mu g d.$$

A desaceleração de um veículo ao frear, mas sem trancar as rodas, ou seja, sem deslizar, depende de quão firme os freios são aplicados. Por conveniência, a desaceleração é freqüentemente expressa como uma fração decimal de g . Se não há evidência de derrapagem, o investigador deve assumir um certo valor para a desaceleração do veículo ao frear. As equações para o movimento com aceleração constante serão também úteis em tais casos.

Colisões

Acidentes quase sempre envolvem colisões de um tipo ou de outro. O Princípio de Conservação do Momento Linear pode ser aplicado. Contudo, tal aplicação depende de se a trajetória e as velocidades dos veículos são conhecidas antes e após o impacto.

O princípio de conservação do Momento pode ser aplicado para determinar as velocidades pré-impacto dos veículos se a massa e as velocidades após o impacto são conhecidas. As velocidades pós-impacto são usualmente determinadas a partir das marcas de derrapagem.

Se dois veículos colidem com um ângulo, o vetor soma do Momento antes do impacto deve ser igualado ao vetor soma do Momento após o impacto. De modo alternativo, podemos equacionar a componente x e, então, a y do Momento antes e após o impacto.

Velocidade crítica em curvas

Um veículo fazendo uma curva, numa estrada nivelada, pode ser considerado como movendo-se ao longo de uma trajetória circular. A força centrípeta do movimento circular é dada pela fórmula:

$$F = \frac{mv^2}{r} ,$$

onde m é a massa do veículo, v sua velocidade e r o raio da curva. Essa força aponta em direção ao centro da curva. A força centrípeta é fornecida pelo atrito lateral entre os

pneus e a superfície da estrada ($\frac{mv^2}{r} = \mu mg$).

Equacionando as duas forças, encontramos, facilmente, que

$$\boxed{v = \sqrt{\mu gr}} .$$

Essa velocidade v é chamada de velocidade crítica para a curva. Ela é independente da massa do veículo e depende somente do coeficiente de atrito dos pneus com a estrada e do raio da curva. Dependendo da velocidade, as seguintes situações ocorrerão quando um veículo faz uma curva:

- a) quando a velocidade do veículo é menor do que a velocidade crítica da curva, o veículo não tem dificuldade em fazer a curva;
- b) quando o veículo anda na velocidade crítica da curva, está viajando no limite da adesão para a estrada. Ele não poderá frear ou guinar a direção sem o risco de uma derrapagem lateral;

c) quando a velocidade do veículo é maior do que a velocidade crítica, a força de atrito não é grande o suficiente para fornecer a força centrípeta necessária. Como resultado, o veículo derrapa lateralmente.

Medindo o raio de uma curva

Na prática, a medida do raio de uma curva somente poderá ser feita de modo indireto. A Geometria nos fornece um método muito interessante.

O raio r de um arco pode ser calculado usando-se uma corda e a fórmula da ordenada do meio:

$$r = \frac{a^2 + h^2}{2h},$$

onde a é metade do comprimento de uma corda do arco e h o comprimento da ordenada do meio (veja Fig. 4).

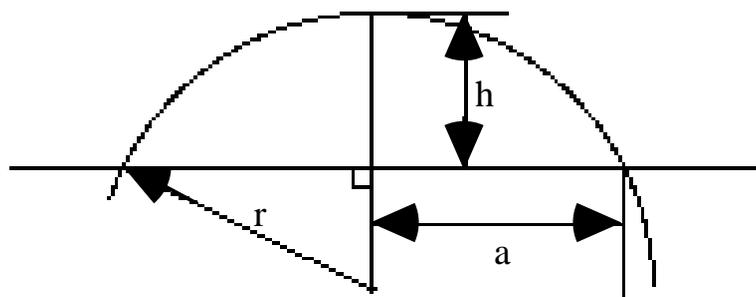


Fig. 4 - A corda e o método da ordenada do meio para medida do raio.

Esse método pode ser utilizado, na prática, para medir o raio de uma curva alinhando-se duas balisas, em dois pontos quaisquer, separados pela distância $2a$.

Projéteis de um veículo

A velocidade de um carro no momento do impacto pode ser estimada se a distância percorrida por seus projéteis pode ser determinada. Contudo, devemos assegurar que a posição em que um projétil se encontra no solo é de fato o local no qual ele bateu pela primeira vez. Desprezamos quaisquer efeitos de resistência do ar ou energia requerida para liberar o projétil do veículo.

Um projétil pode ser lançado de um carro num ângulo ou um carro pode cair de uma rodovia inclinada. O ângulo com o qual o projétil é lançado afeta consideravelmente seu alcance. Ignorar esse ângulo significa fornecer uma estimativa errônea para a velocidade.

Se o ângulo de lançamento do projétil não é conhecido, devemos assumir um valor dependente de evidência circunstancial.

III. O Programa IAT²

Com base na relevância do tema, o pessoal do Projeto Desenvolvimento e Uso de Ferramentas Computacionais para o Aprendizado Exploratório de Ciências (veja o C.C.E.F. volume 10, nº 2) decidiu por desenvolver um programa dedicado à Investigação de Acidentes de Trânsito que trata alguns tópicos da Mecânica, além de ser voltado para o cotidiano dos alunos.

O programa³ tem como objetivos principais:

- auxiliar investigadores de acidentes de trânsito;
- servir de material de apoio a professores de Física interessados em desenvolver tópicos de Mecânica voltados para a realidade e
- conscientizar estudantes e motoristas em relação à segurança no trânsito.

A seguir, faremos uma breve descrição das opções apresentadas no Menu Principal do programa IAT⁴ :

- Calculando o coeficiente de atrito (possibilita calcular o coeficiente de atrito a partir de medidas no local com a balança de molas);
- Estimando o coeficiente de atrito (possibilita estimar o coeficiente de atrito a partir do comprimento de marcas de derrapagem e da velocidade previamente estimada do automóvel);
- Estimando a velocidade (permite calcular a velocidade de um automóvel a partir do comprimento de marcas de derrapagem e do coeficiente de atrito);
- Colisões com ângulo (permite estimar a velocidade de carros em uma colisão a partir do comprimento de marcas de derrapagem e da configuração dos carros após o acidente);
- Velocidade crítica nas curvas (permite estimar a velocidade crítica em curvas a partir do raio e do coeficiente de atrito);
- Curva de Raio "R" (análise de uma curva, onde o usuário deve estabelecer a velocidade crítica);
- Curva Inclinada (Análise de curvas inclinadas possibilitando a comparação entre curvas planas e inclinadas de mesmo raio);

² Programado por Ana Alzira Kleer.

³ 3º lugar - Prêmio Jovem Pesquisador, no IV Congresso de Iniciação Científica (FURG/UFPel/UCPel).

⁴ Menção Honrosa no VIII Salão de Iniciação Científica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (VIII SIC/UFRGS).

- Projéteis de um veículo (permite estimar a velocidade de projéteis lançados de um veículo).

Dentro do programa, o usuário dispõe de material de apoio, tal como saída gráfica e animação, além de toda a fundamentação teórica explicada passo a passo. Por exemplo, se o usuário não tem conhecimento de como calcular o raio de uma curva, ele pode visualizar gráfica e textualmente o método utilizado. Se o usuário quer simplesmente estudar algum tópico, tal como Conservação do Momento Linear, ele dispõe da teoria e de exemplos.

IV. Conclusão

O presente artigo não esgotou todos os princípios que podem ser utilizados nas aulas de Física, tal como a análise de derrapagens em rampas, curvas inclinadas, métodos utilizados no levantamentos de dados no local a ser investigado, entre outros. Além disso, por falta de espaço, tratamos superficialmente alguns tópicos que poderiam ter sido mais aprofundados.

O programa IAT não tem o objetivo de substituir as aulas de Física. O programa deve ser utilizado como uma ferramenta para auxiliar professores e alunos em estudos de caso.

A investigação de acidentes de trânsito desperta bastante interesse em alunos de 2º e 3º graus, o que facilita o aprendizado de Física. Recentemente, encerramos um curso para professores e, após o uso do programa, os mesmos se mostraram bastante motivados a utilizarem os princípios da Mecânica voltados para a investigação de acidentes de trânsito. Através do programa e de estudos de casos, feitos com o auxílio de um vídeo com filmagens da BR 392, mostrando cenas de marcas de derrapagens e curvas, conseguimos despertar o interesse de professores e alunos. Isto nos leva a acreditar na relevância da Física quando aplicada a problemas do cotidiano.

Referências

HALLIDAY, R. & RESNICK, R. *Fundamentos de Física*. V.1, Rio de Janeiro, 1990.

SHERWOOD, Bruce A. e Sherwood, Judith N. *Language Manual cT*. Version Physics Academic Software. Carnegie Mellon University and Sonoma State University, 1989.

TAO, P. K. *The Physics of Traffic Accident Investigation*. Oxford University Press. Hong Kong, 1987.