
ROLAMENTO SEM ESCORREGAMENTO: ATRITO ESTÁTICO OU ATRITO DE ROLAMENTO?

Helena Caldas
Maria Elisa Magalhães
Departamento de Física - UFES
Vitória - ES

Resumo

Este trabalho promove uma breve discussão sobre o atrito no movimento de rolamento sem escorregamento, tendo em vista os resultados obtidos num estudo exploratório com professores do Ensino Fundamental e Médio. Este estudo mostrou que a maioria da população envolvida, quando confrontada com situações físicas onde sólidos supostamente indeformáveis rolam sem escorregar, tende a considerar a existência de um atrito cinético, ou de um atrito de rolamento, ou até mesmo de um atrito desprezível entre as superfícies em contato, e somente uma minoria considera que o atrito é estático. Constatou-se, ainda, uma tendência dos professores em relacionar o tipo de atrito considerado com a magnitude das áreas de contato dos sólidos. O conjunto dos resultados encontrados indica a necessidade de uma atenção redobrada, por parte dos professores de Física, quanto ao ensino do fenômeno do atrito e seus desdobramentos nos diversos tipos de movimento, especialmente aqueles que lecionam para os cursos de licenciatura ou trabalham com a formação e atualização de professores.

I. Introdução

Por intermédio de um estudo exploratório com professores da 8^a série do Ensino Fundamental e do Ensino Médio, este trabalho promove uma breve discussão física sobre o atrito no movimento de rolamento sem escorregamento e coloca em evidência as principais tendências das concepções e modos de raciocínio de senso comum da população interrogada quando confrontada com uma situação física, extremamente simples, de atrito no movimento de rolamento sem escorregamento.

O estudo apóia-se na análise das respostas e justificativas apresentadas pelos professores, num questionário a eles proposto, bem como numa discussão

informal dos resultados obtidos, efetuada após a análise do questionário, com o propósito de confirmar, aprofundar ou esclarecer estes resultados.

II. O atrito no movimento de rolamento sem escorregamento

II-1. Contato entre sólidos

O contato entre um sólido e a superfície sobre a qual se apóia pode realizar-se em um ou vários pontos (contatos pontuais), segundo uma curva (contato linear) ou, o mais freqüentemente, segundo uma área (contato superficial).

Na verdade, não existe contato rigorosamente pontual ou linear, pois estes são contatos teóricos (ideais): o contato sempre se efetua segundo uma pequena área, que inclui a linha, o ponto ou os pontos de contato supostos.

Assim, os contatos teóricos supõem a perfeição geométrica e a rigidez infinita dos sólidos em contato, o que constitui uma idealização da realidade, não só quanto à perfeição geométrica dos sólidos, mas também quanto ao conceito de sólido indeformável: existe sempre uma ligeira deformação por contato, por menor que ela seja, o que implica que a zona de contato não pode ser rigorosamente pontual ou linear.

Entretanto, isto não significa que a idealização dos contatos não permita uma boa aproximação na maioria dos fenômenos observados.

II-2. Atrito estático

Quando os sólidos e as superfícies sobre as quais eles rolam são considerados indeformáveis, os contatos serão pontuais teóricos, como no caso da esfera ou lineares teóricos, como o cilindro.

Desta forma, se nos detivermos no movimento de rolamento sem escorregamento, por exemplo, de uma esfera, veremos que a velocidade relativa de escorregamento do ponto de contato da esfera em relação à superfície é nula, pois não existe deslizamento¹.

Se não existe este deslizamento do ponto de contato, isto implica que, se existe atrito entre as superfícies em contato, ele é estático, obedecendo a todas as leis e propriedades pertinentes a este fenômeno, apesar do sólido ter um movimento não nulo em relação à superfície, ou seja, rolar sobre ela. Assim, o centro de massa da esfera

¹ *Deslizamento e escorregamento* são os dois termos utilizados na literatura para descrever o movimento em questão; então, serão aqui tratados como sinônimos. Da mesma forma, *velocidade relativa de escorregamento* = *velocidade relativa de deslizamento*.

translada-se, isto é, está animado de um movimento de translação em relação à superfície sobre a qual rola; portanto, deste ponto de vista, o sólido não está em repouso, mas o atrito presente é estático.

Então, seria inadequado afirmar, de forma geral, que quando o atrito entre os sólidos em contato é estático, os corpos estão em “repouso” ou em eminência de “movimento”, pois os objetos em estudo podem ter um movimento em relação a um dado referencial e o atrito ser estático. Assim, o “repouso” ao qual está associado o atrito estático é o *repouso relativo* das superfícies em contato, umas em relação às outras, ou melhor, é o *movimento de não escorregamento relativo* das superfícies, umas em relação às outras.

Portanto, enquanto não houver deslizamento do sólido sobre a superfície, o atrito será sempre estático e o trabalho realizado pela força de atrito estático será nulo: a velocidade relativa de deslizamento do ponto de contato em relação à superfície será nula a cada instante, à medida que o sólido rola. Conseqüentemente, neste caso, a força de atrito não seria uma força dissipativa.

Assim sendo, como então os sólidos que rolam sem deslizar sobre uma superfície atingem o repouso ao fim de certo tempo? Seria somente a resistência do ar que os faria parar?

II-3. O atrito de rolamento

Quando consideramos a não rigidez dos corpos, devido à área de contato não mais se limitar a um ponto (contato pontual teórico) ou a uma linha (contato linear teórico), mas a uma área que envolve o ponto ou a linha de contato (contatos reais), aparece no movimento de rolamento o que é habitualmente chamado de *momento de resistência ao rolamento*: este momento (um torque) traduziria o fenômeno do atrito neste tipo de movimento, quando se considera a deformação dos sólidos em contato que, para simplificar, poderemos chamar de “atrito de rolamento”.

Assim, o rolamento sem deslizamento de um sólido é sempre acompanhado de um atrito ligado às “perdas” de energia, isto é, à transformação de energia mecânica em energia térmica, devido à deformação das superfícies em contato.

Efetivamente, um sólido que rola sem escorregar num plano horizontal vai progressivamente parar: além da resistência do ar, aparece igualmente o atrito de rolamento, que depende das propriedades dos materiais em contato.

Desta forma, a principal diferença entre o atrito estático (atrito que aparece no rolamento sem deslizamento quando consideramos os sólidos em contato como indeformáveis) e o atrito de rolamento (quando admitimos a deformação dos sólidos em contato, por menor que ela seja) é que, quando o atrito é estático, não existe a transformação de energia mecânica em calor.

Consideremos, então, um cilindro que rola sem escorregar numa superfície horizontal, sendo uniforme o seu movimento. No eixo do cilindro que rola sobre o plano horizontal, uma força horizontal constante F é aplicada na direção do movimento.

A resultante R das forças de contato exercidas pelo plano horizontal sobre o cilindro, devido à deformação, será orientada e aplicada como mostra a Fig. 1: o ponto de aplicação de R , uma vez que o contato não é mais pontual, porém, segundo uma dada área, será forçosamente deslocado de um determinado comprimento λ em relação a P , único ponto de contato, se o contato fosse pontual.

A componente vertical desta força resultante R será a normal N , e a componente horizontal (e tangencial às superfícies em contato) f_r será a força de atrito, cujo módulo será igual ao módulo da força F .

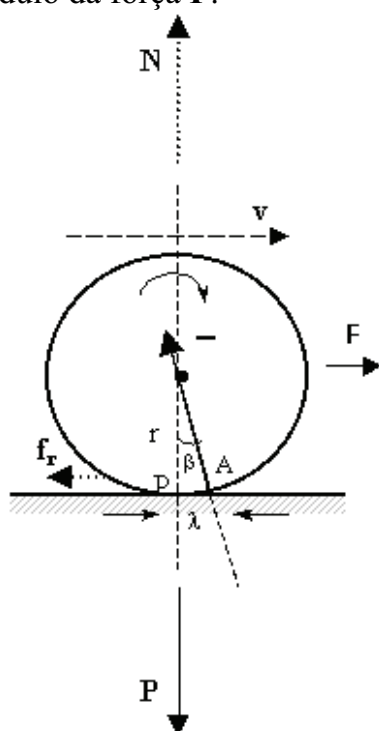


Fig. 1: Cilindro que rola sem escorregar pela ação de F (movimento uniforme).

Como o movimento do cilindro é uniforme e as suas acelerações de translação e angular são nulas, a força resultante R deverá passar pelo eixo do cilindro.

Considerando que a distância λ é muito pequena em relação ao raio do cilindro ou que o ângulo de inclinação é muito pequeno, a intensidade de R é aproximadamente igual, neste caso, ao peso P .

Assim:

$$N = P = R \cos \beta \quad \text{e} \quad F = R \sin \beta = f_r$$

Considerando β muito pequeno, podemos escrever:

$$P \cong R \quad e \quad f_r \cong R \beta \cong P \lambda/r \rightarrow f_r r \cong \lambda P$$

$M_r = \lambda P$ é o chamado *momento de resistência ao rolamento*. A grandeza λ expressa em unidades de comprimento, é normalmente chamada de *coeficiente de resistência ao rolamento*, dependendo essencialmente dos materiais em contato.

Se os materiais em contato são suficientemente “duros” e a pressão de contato (força por unidade de área) é baixa, o coeficiente λ é ínfimo.

Provavelmente, este é um dos motivos pelo qual o momento de resistência ao rolamento não é geralmente estudado ou até mencionado, mesmo nos cursos universitários de Física Básica. Isto significa que se admite, implícita ou explicitamente, a aproximação de que os corpos são indeformáveis: o atrito no movimento de rolamento sem escorregamento é, então, tratado como sendo sempre estático.

II-4. Resumo do quadro teórico

Do acima exposto, podemos resumir os seguintes pontos-chave que envolvem o atrito entre sólidos e sem adição de fluido (atrito sólido seco) e o movimento de rolamento sem escorregamento:

No movimento de rolamento sem escorregamento, considerando os sólidos indeformáveis e geometricamente perfeitos e a despeito dos sólidos estarem em movimento,

- a velocidade relativa de escorregamento do ponto de contato do sólido com a superfície sobre a qual ele rola é nula a cada instante, pois o movimento é sem escorregamento;
- o atrito que intervém é o atrito estático, pois este tipo de atrito não está associado ao “repouso” dos sólidos num dado referencial: ele está unicamente associado ao *repouso relativo* das superfícies em contato, isto é, ao *movimento de não escorregamento relativo* das superfícies em contato, umas em relação às outras;
- o atrito cinético é nulo, pois este tipo de atrito não está associado ao “movimento” dos sólidos num dado referencial: ele está unicamente associado ao *movimento de escorregamento relativo* das superfícies em contato, umas em relação às outras. No caso da existência de um atrito cinético, a velocidade relativa de escorregamento das superfícies em contato seria, portanto, não nula;
- o atrito de rolamento não pode ser fisicamente definido, pois ele somente intervém quando se leva em conta a deformação dos sólidos em contato.

III. Os professores e o atrito no movimento de rolamento sem escorregamento

III-1. O questionário

Foi proposto um questionário a 53 professores da 8ª série do Ensino Fundamental e do Ensino Médio, que faziam um curso de atualização para professores², com o objetivo de saber como esta população, respondendo no anonimato, classificaria o atrito existente no movimento de rolamento sem escorregamento.

Este curso tinha uma carga horária total de 120 horas, distribuída numa estrutura modular temática que abrangia vários tópicos de Física, onde 9 horas foram ocupadas com o tema do atrito.

A maioria dos professores participantes tinha o curso universitário completo (licenciatura) e, também, a maioria deles, era oriunda da rede de ensino pública do estado.

Assim, foi elaborado o questionário abaixo descrito, onde se confrontavam três situações físicas bastante simples e sem ambigüidades, tendo sido aplicado este imediatamente antes de ministrar-se o tópico do atrito:

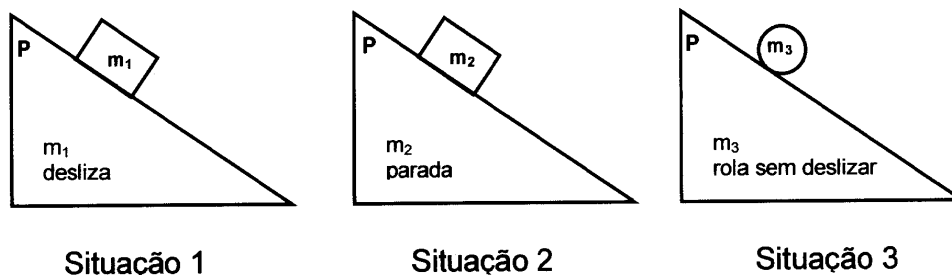
Questionário ³

Considere as três situações físicas abaixo descritas e as respectivas figuras:

Situação 1: O bloco de massa m_1 **desliza** sobre o plano inclinado P.

Situação 2: O bloco de massa m_2 **permanece em repouso** sobre o plano inclinado P.

Situação 3: A esfera de massa m_3 **rola sem deslizar** sobre o plano inclinado P.



² Cursos financiados pela CAPES e ministrados por professores da Universidade Federal do Espírito Santo, em Vitória e Cachoeiro de Itapemirim (ES), 1999.

³ As respostas corretas já foram marcadas.

Considerando que m_1 , m_2 , m_3 e P são sólidos indeformáveis e que as superfícies dos sólidos em contato são ásperas (não lisas), que **tipo de atrito** existe entre:

a) m_1 e P , na situação 1?

Estático Cinético ou Dinâmico Outro tipo de atrito

Qual? _____

Justifique:

b) m_2 e P , na situação 2 ?

Estático Cinético ou Dinâmico Outro tipo de atrito

Qual? _____

Justifique:

c) m_3 e P , na situação 3 ?

Estático Cinético ou Dinâmico Outro tipo de atrito

Qual? _____

Justifique:

III-2. Resultados

As duas primeiras situações, que correspondem aos dois primeiros itens, somente foram colocadas para que existisse um confronto com a terceira e, obviamente, era esperado que houvesse 100% de acertos nestes itens, como foi o caso.

As justificativas dadas a esses itens, como era também esperado, foram todas do tipo:

- No item a), o atrito é cinético porque o bloco está em movimento ou desliza sobre o plano.
- No item b), o atrito é estático porque o bloco está em repouso ou não desliza sobre o plano.

Quanto à terceira situação, correspondente ao item c), as respostas dos professores distribuíram-se segundo a tabela 1:

Tabela 1: Respostas ao item c

Atrito estático	Atrito cinético	Atrito de rolamento	Atrito desprezível	Sem resposta	Total
N=17 (32,1%)	N=16 (30,2%)	N=8 (15,1%)	N=3 (5,6%)	N=9 (17%)	N=53 (100%)

Numa primeira observação, constatamos que um pouco menos de 1/3 dos professores marcou a resposta correta (atrito estático).

Constatamos, também, que o percentual de professores que não responderam a este item é relativamente elevado, enquanto que todos responderam ao primeiro e ao segundo item.

Apresentamos, em seguida, o tipo de justificativas dadas.

O atrito é estático porque ⁴:

- Não há deslizamento, embora a esfera role (47,1%).
- Porque existe uma pequena área de contato (35,3%).
- Sem justificativa (17,6%).

O atrito é cinético, porque:

- A esfera está em movimento.

Vários professores acrescentaram a este tipo de justificativa, argumentos relacionados com o tamanho menor da área de contato da esfera, como mostra a citação:

O atrito continua a ser cinético, como no item a) por a esfera estar em movimento, acrescentando que, devido à sua forma geométrica, a área de contato é menor, logo, a força de atrito é menor.

O atrito é de rolamento, porque⁵:

- A superfície rola sobre a outra ou porque a esfera rola (60%).
- A esfera não desliza (40%).

Não existe atrito ou ele é desprezível porque:

· A área de contato é muito pequena, portanto a força de atrito ou o atrito sendo desprezível, não é suficiente para “dificultar” ou “prender” o movimento.

Podemos constatar que, considerando as justificativas dadas, apenas 15,1% (N=8) do total de professores respondeu corretamente a este item.

Observamos, ainda, que as justificativas que abordam ou que se baseiam no tamanho da área de contato, permeiam os vários tipos de atrito considerados (estático, cinético e atrito desprezível).

⁴ Os percentuais foram calculados sobre a população que marcou “atrito estático”

⁵ Os percentuais foram calculados sobre a população que respondeu “atrito de rolamento”

III-3. A discussão informal

Após a análise dos resultados do questionário, algumas questões ainda precisavam ser melhor esclarecidas a respeito do item c), tais como:

- O que os professores queriam dizer com “atrito de rolamento”? Como o definiam? Existiria algum conhecimento da relação deste tipo de atrito com a deformação dos sólidos?
- O que os levava a relacionar a existência do atrito estático com “uma pequena área de contato”, se a justificativa utilizada no item b) para a qualificação do atrito estático, era o estado de repouso do corpo?
- Por que um grande número de professores não respondeu a este item, se os outros itens foram respondidos por todos?
- Qual era, finalmente, a relação dos diferentes tipos de atrito com o tamanho da área de contato?

Assim, os resultados obtidos foram expostos em transparências para o grupo de professores e utilizou-se a seguinte metodologia: os resultados foram debatidos através de uma discussão informal, mas com uma certa “orientação”, visto que se buscava elementos que elucidassem as justificativas fornecidas no questionário. Isto significa que se intervinha, sempre que a discussão eventualmente se afastava dos objetivos propostos.

Este processo esclareceu, confirmou ou aprofundou os seguintes pontos:

- O atrito de rolamento que aparecia nas respostas não tinha nenhuma relação com a deformação ou não dos corpos. Era chamado de rolamento simplesmente porque os corpos rolavam e as leis ou propriedades que regeriam esse tipo de atrito não eram claras para os professores. Ou ele era associado ao atrito estático, porque o corpo não deslizava, ou ao atrito cinético, porque o corpo se movia, mas, ao mesmo tempo, seria um atrito de natureza diferente, pois o corpo rolava.
- Confirmou-se que a ausência de respostas no terceiro item, estava associada com a falta de clareza sobre este tipo de movimento.
- A independência do atrito com a área aparente de contato não apareceu como um conceito trivial e de fácil aceitação.

Tudo indica que o senso comum parece apontar para uma tendência geral do seguinte modo de raciocínio:

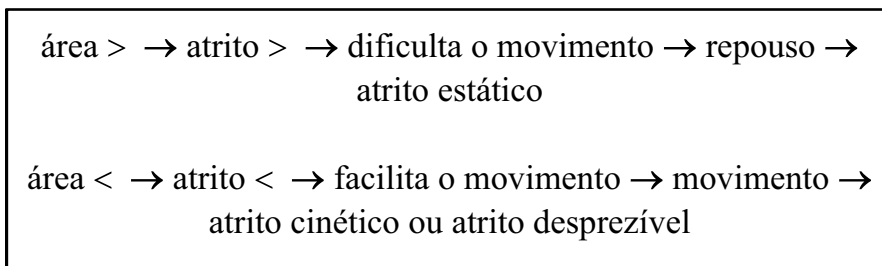
A uma área maior de contato corresponderia um atrito maior, portanto, a uma área menor corresponderia um atrito menor.
--

Este modo de raciocínio pode ter dois desdobramentos com as seguintes conseqüências:

1. Quando se compara o tamanho das áreas de contato dos corpos, para justificar o atrito cinético ou o atrito desprezível no movimento de rolamento sem escorregamento:

Como a área de contato da esfera com a superfície é menor, o atrito é menor, portanto ele não é suficiente para “prender” o movimento e manter o corpo em repouso (atrito estático). Como conseqüência, o corpo entra em movimento (rola), portanto o atrito é cinético ou desprezível.

Resumindo, teríamos, de um tipo de atrito para outro:

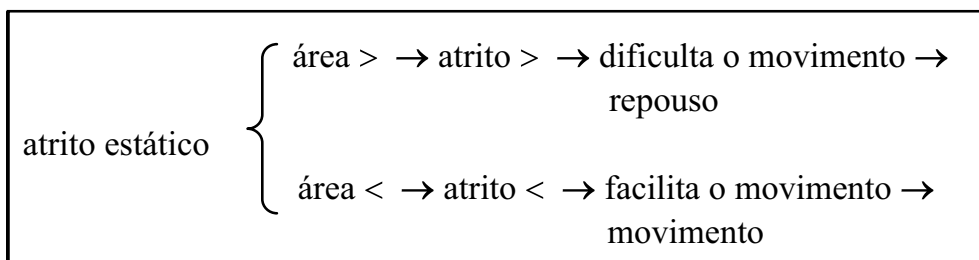


Como se observa, este modo de raciocínio também serve para justificar a categoria de atrito desprezível, no movimento de rolamento sem escorregamento.

2. Quando se comparam as áreas de contato entre dois corpos, para justificar que, apesar do atrito ser estático, o corpo se movimenta, observamos o mesmo modo de raciocínio:

Dentro do fenômeno de atrito estático, como a área de contato da esfera com a superfície é menor (comparativamente à área do bloco em repouso sobre o plano), o atrito é menor e, devido à forma esférica do corpo, este atrito não é suficiente para “prendê-lo”, portanto, o corpo rola.

Resumindo, teríamos, dentro do atrito estático:



IV. Conclusão

Este estudo exploratório revela uma série de dificuldades da população envolvida (não esqueçamos que se tratam de professores) na apreensão de vários aspectos do fenômeno do atrito, em particular da manifestação deste fenômeno no movimento de rolamento sem escorregamento.

Em resumo, relacionando o quadro teórico apresentado na primeira parte deste trabalho (item II) com os resultados obtidos com a população envolvida no estudo, as evidências indicam que as principais dificuldades encontradas por esta população estão ligadas ao fato de que:

- No movimento de rolamento sem escorregamento, a velocidade relativa de escorregamento do ponto de contato do sólido com a superfície é nula a cada instante, apesar do centro de massa do sólido mover-se com uma velocidade de translação não nula em relação à superfície.

- O atrito estático nem sempre está associado a todas as situações de repouso num dado referencial e nem todas as situações de movimento nesse referencial estão associadas ao atrito cinético.

- O atrito de rolamento só aparece quando se considera a deformação das superfícies em contato.

Investigações anteriores a respeito das concepções e modos de raciocínio de senso comum sobre o atrito, com estudantes de vários países (Brasil, França, Portugal, Itália e Espanha), na busca do modelo estudantil sobre este fenômeno (Caldas H. 1994, Caldas H. & Saltiel E. 1995, Caldas H. 1999, Caldas H. & Saltiel E. 2000), já sinalizavam que a maioria da população tendia a definir o sentido das forças de atrito cinético e estático relacionando-o, respectivamente, com o movimento ou com a iminência de movimento dos sólidos num dado referencial, sem referência alguma aos movimentos relativos de escorregamento das superfícies em contato.

Entretanto, um outro elemento apareceu nas justificativas dos professores, que foge ao quadro teórico do movimento de rolamento sem escorregamento: a relação por eles estabelecida entre as áreas aparentes de contato e os tipos de atrito atribuídos.

Ora, do ponto de vista científico, o atrito independe das áreas aparentes de contato entre os sólidos e, portanto, não existe relação que determine o tipo de atrito em função da magnitude desta área.

Assim, paralelamente aos resultados obtidos quanto à problemática geral do trabalho “tipos de atrito/movimento de rolamento sem escorregamento”, este estudo revelou, ainda, que a questão “atrito/áreas de contato”, constitui, também, um ponto “sensível” na apreensão do fenômeno do atrito sólido seco, para a população interrogada.

Segundo Viennot (1996) e Joshua & Duppin (1993), muitas das dificuldades dos aprendizes levam à construção de modos de raciocínio próprios, na busca de uma explicação para o problema, cuja lógica não se assenta na lógica científica, mas tem como pano de fundo o senso comum.

Nesta ótica, no que se refere à questão “atrito/áreas de contato” dentro do contexto geral do estudo, podemos interpretar que algumas das dificuldades apresentadas pelos professores quanto ao movimento de rolamento sem escorregamento foram, aparentemente, contornadas: buscou-se uma explicação para o problema, utilizando-se modos de raciocínio próprios, cuja lógica diferia da lógica científica, pois relacionavam a magnitude aparente das áreas de contato com os tipos de atrito atribuídos, tendo como pano de fundo a concepção de senso comum que determina a dependência do atrito com as áreas (aparentes) de contato.

Para concluir, o conjunto dos resultados encontrados indica, de um lado, a necessidade de um aprofundamento maior da pesquisa na área de Ensino de Física neste campo e, de outro lado, a necessidade de uma atenção redobrada por parte dos professores de Física, quanto ao ensino do fenômeno do atrito e seus desdobramentos nos diversos tipos de movimento, especialmente aqueles que lecionam para os cursos de licenciatura ou trabalham com a formação e a atualização de professores.

V. Agradecimentos

Agradecemos reconhecidamente ao professor Ennio Candotti pelo incentivo dado ao nosso trabalho e pelas proveitosas e sempre oportunas discussões sobre o tema do atrito.

VI. Referências Bibliográficas

ANNEQUIN & BOUTIGNY, 1972. Cours de physique. Mécanique 2; 1^{er} cycle universitaire et mathématiques supérieurs. Vuibert, Paris.

CALDAS H., 1994. Le frottement solide sec: le frottement de glissement et de non glissement: étude des difficultés des étudiants et analyse de manuels. Tese de doutorado, Université Paris 7.

CALDAS H. & SALTIEL E., 1995. Frottement cinétique : analyse des raisonnements de étudiants. Didaskalia : Recherches sur la communication et l'apprentissage des sciences et des techniques. 6: 55-71.

CALDAS H., (colaboração de E. Saltiel), 1999. Atrito: o que diz a Física, o que os alunos pensam e o que os livros explicam. Edufes, Vitória ES, Brasil.

- CALDAS H. & SALTIEL E., 2000. Frottement statique : analyse des raisonnements de étudiants. *Didaskalia : Recherches sur la communication et l'apprentissage des sciences et des techniques*. 17: in press.
- FONSECA A. , 1972. Curso de Mecânica - volume III. Dinâmica. Ao Livro Técnico S. A., Rio de Janeiro.
- GIE H. & SARMANT Y., 1985. Mécanique, Volume 2. Collection Sciences Physiques. Lavoisier, Paris.
- JOSHUA S. & DUPIN J.J. ,1993. Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques. P.U.F., Paris.
- LANDAU L. & LIFCHITZ E., 1967. Théorie de L'Elasticité. Editons Mir, Moscou.
- LANDAU L., AJIEZER A. & LIFCHITZ E., 1973. Curso de Física General. Mecânica y Física Molecular. Mir, Moscou.
- NUSSENZVEIG H. M., 1996. Curso de Física Básica. 1-Mecânica. Editora Edgar Blucher, S. Paulo.
- STRELKOV S., 1978. Mécanique. Editions Mir, Moscou.
- VIENNOT L., 1996. Raisonner en physique. La part du sens commun. De Boeck Université, Paris, Bruxelles.