



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL
EM ENSINO DE FÍSICA

RODOLFO DE LUNA OLIVEIRA

**ABORDAGEM ALTERNATIVA PARA O PROBLEMA DA SEPARAÇÃO DE DUAS
LISTAS TELEFÔNICAS**

Caruaru

2018

RODOLFO DE LUNA OLIVEIRA

**ABORDAGEM ALTERNATIVA PARA O PROBLEMA DA SEPARAÇÃO DE
DUAS LISTAS TELEFÔNICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Área de concentração: Ensino de Física.

Orientador: Prof^o. Dr. Paulo Henrique Ribeiro Peixoto.

Caruaru
2018

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier - CRB/4 - 1242

O48a Oliveira, Rodolfo de Luna.
Abordagem alternativa para o problema da separação de duas listas telefônicas. /
Rodolfo de Luna Oliveira. - 2018.
107 f.; il.: 30 cm.

Orientador: Paulo Henrique Ribeiro Peixoto.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Mestrado
Nacional Profissional em Ensino de Física, 2018.
Inclui Referências.

1. Atrito. 2. Tecnologia da informação. 3. Física – Estudo e ensino. 4. Recursos
audiovisuais. I. Peixoto, Paulo Henrique Ribeiro (Orientador). II. Título.

371.12 CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2018-239)

RODOLFO DE LUNA OLIVEIRA

**ABORDAGEM ALTERNATIVA PARA O PROBLEMA DA SEPARAÇÃO DE
DUAS LISTAS TELEFÔNICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada em: 13/09/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. Paulo Henrique Ribeiro Peixoto (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Ernesto Arcenio Valdés Rodriguez (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Pedro Hugo de Figueirêdo (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dedico este trabalho ao meu pai Antônio Pereira de Oliveira e à minha mãe Maria Luiza de Luna Oliveira, por toda contribuição à minha formação pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha esposa Raquel Fraga e a minha filha Cecília Fraga por sempre me apoiar, motivar e acreditar durante todos os momentos dessa caminhada.

A todos os professores que pertencem ao programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de Pernambuco do Centro Acadêmico do Agreste por seus ensinamentos enriquecedores para minha formação profissional e acadêmica.

Em especial ao professor Paulo Henrique Ribeiro Peixoto, por sua dedicação e orientação durante toda a elaboração desta dissertação.

Aos meus colegas de turma, em especial os senhores Cícero Dias, Daeme Teles, Eduardo Botelho e Rubens Antônio.

Ao meu irmão Bruno Luna pelo apoio prestado e motivação desde o dia da inscrição para a seleção no programa, sendo extremamente importante nesse processo.

Aos meus companheiros de trabalho, em especial ao corpo docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas do campus Santana do Ipanema e à turma do 2º série A do curso técnico integrado em agropecuária.

Ao meu grande amigo, professor Valdemir Chaves por sempre acreditar em mim, incentivando a buscar o crescimento pessoal e profissional, desde a época da minha graduação, sendo peça fundamental na minha vida enquanto docente.

A todos meus amigos e familiares.

RESUMO

No ensino de física, vários desafios são encontrados por professores e alunos durante o processo de ensino-aprendizagem. O professor como mediador tem como um de seus desafios elaborar estratégias para facilitar o aprendizado dos alunos. O objetivo desta dissertação é propor uma ferramenta pedagógica relacionada ao ensino de forças de atrito. Nós investigamos o problema da separação de duas listas telefônicas com suas folhas intercaladas. Inicialmente, apresentamos algumas ideias centrais de trabalhos que contribuíram para o desenvolvimento de conceitos relacionados ao atrito, e também comentamos brevemente a Teoria da Aprendizagem de Ausubel. Em sequência, discutimos um artigo científico relacionado ao problema da separação de duas listas telefônicas e apresentamos nossos cálculos teóricos e a realização experimental. Concluímos apresentando, como proposta, uma ferramenta para o ensino de força de atrito: uma produção audiovisual que será disponibilizada na Internet, e relatamos nossa experiência sobre o uso desse vídeo em sala de aula.

Palavras-chave: Atrito. Separação de listas telefônicas. TIC.

ABSTRACT

In physics teaching, several challenges are encountered by teachers and students during the teaching-learning process. The teacher as mediator has as one of his or her challenges to devise strategies to facilitate learning. The aim of this dissertation is to propose a pedagogical tool related to the teaching of forces of friction. We investigated the problem of separation of two phonebooks with interleaved sheets. Initially, we present some central ideas from works that contributed to the development of concepts related to friction, and we also briefly comment the Ausubel's Learning Theory. In sequence, we discuss a scientific paper related to the problem of separation of two phonebooks, and present our theoretical calculations and experimental realization. We conclude by presenting, as a proposal, a tool for the teaching of force of friction: an audiovisual production that will be made available on the Internet, and we report our experience on the use of that video in a classroom.

Keywords: Friction. Separation of phonebooks. TIC.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	REVISÃO DA LITERATURA	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3	MODELO DE ALÁRCON E COLABORADORES	25
3.1	EXPERIMENTO REALIZADO POR ALÁRCON E COLABORADORES ..	25
3.2	MODELO TEÓRICO ELABORADO POR ALÁRCON E COLABORADORES	26
3.3	PONTOS QUE NÃO FORAM DISCUTIDOS POR ALÁRCON E COLABORADORES	29
3.4	MODELO TEÓRICO.....	30
4	O EXPERIMENTO	35
4.1	A MOTIVAÇÃO	35
4.2	EXPECTATIVAS DA EXECUÇÃO	35
4.3	CONSTRUÇÃO DO APARATO	37
4.4	DIFICULDADES NAS MEDIÇÕES.....	39
4.5	NOVA ESTRATÉGIA.....	41
4.6	COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO EXPERIMENTAL.....	51
4.6.1	MÉTODO DE OBTENÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO UTILIZANDO O APARATO EXPERIMENTAL.....	51
4.6.2	MÉTODO DE OBTENÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO UTILIZANDO UM PLANO INCLINADO.....	53
5	ELABORAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL	58
6	RELATO DA EXPERIÊNCIA DE APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL	60
7	CONCLUSÕES	68
	REFERÊNCIAS	70
	APÊNDICE A - MANUAL DE CONSTRUÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL	73
	APÊNDICE B - MANUAL DE CONSTRUÇÃO DO PLANO INCLINADO PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO ..	95
	APÊNDICE C – PRODUTO EDUCACIONAL	97

1 INTRODUÇÃO

O ensino de Física ao longo do tempo foi se tornando cada vez mais mecanicista: o aluno não percebe o significado por trás dos conceitos vistos, por pertencer a um processo que preza a simples memorização, e com o único objetivo de realizar uma boa avaliação à qual será submetido. Muitos são os fatores responsáveis; um deles está diretamente ligado à prática docente nesse processo. O professor utiliza um método mecânico, não se importando em tentar criar estratégias que possam facilitar o entendimento por parte dos seus alunos e conseqüentemente não havendo uma lógica em se aprender, além dos conteúdos serem repassados de maneira fragmentada sem ser levada em conta a ligação entre eles. Vários são os estudos acerca deste tema em tentar melhorar o ensino da física, mas infelizmente quase todos ficam apenas nos papéis e guardados nas bibliotecas das universidades. Visto isso, os programas de mestrados profissionais visam tentar mudar um pouco essa realidade, tendo como objetivo principalmente a elaboração de produtos educacionais que possam efetivamente ser aplicados no ensino.

Portando, esta dissertação de mestrado tem como um de seus objetivos o desenvolvimento de um produto educacional com possibilidades de uso em sala de aula tanto pelo professor, como também pelo aluno, sobre o tema atrito, envolvendo o problema da dificuldade de separação de duas listas telefônicas com suas folhas intercaladas, a partir de uma investigação de um estudo divulgado em revista científica. Como também, a apresentação de uma proposta experimental do aparato utilizado em nosso estudo, presente no apêndice A deste trabalho.

Como forma de organizar estruturalmente este trabalho, no capítulo 1 apresentamos uma breve revisão de literatura com aspectos históricos da evolução do conceito de atrito, algumas práticas experimentais abordando a tentativa de separação das listas telefônicas e a apresentação do trabalho científico que utilizamos como referência no nosso estudo. No capítulo 2 comentamos nossa fundamentação teórica, onde expomos os três pilares utilizados para a construção deste trabalho: a aprendizagem significativa de

Ausubel, o uso das tecnologias de informação e comunicação e as leis do atrito de Amontons e Coulomb. No capítulo 3, apresentamos um resumo do artigo publicado na *Physical Review Letters* elaborado por Héctor Alarcón e colaboradores, mostrando o aparato experimental utilizado por ele e a expressão conseguida por eles para a intensidade da força para separação das listas telefônicas. Nesse mesmo capítulo, levantamos os aspectos que não foram levados em consideração pelos autores do artigo e mostramos o nosso modelo teórico a partir desses fatores não abordados. Já no capítulo 4, descrevemos todo o processo de construção e execução, assim como nossos dados obtidos, a partir da nossa prática experimental, enfatizando as dificuldades encontradas. Nos capítulos 5 e 6 retratamos a elaboração e a utilização do nosso produto educacional na turma do 2º ano do curso técnico integrado em agropecuária do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas no campus Santana do Ipanema. E finalmente, no capítulo 7, apontamos nossas conclusões acerca do todo o processo desenvolvido, salientando os pontos positivos e as limitações da nossa proposta.

1.1 REVISÃO DA LITERATURA

Como agente transformador do ambiente a que pertence, o homem vem percebendo a necessidade e importância de entender melhor a influência do atrito nas suas práticas de sobrevivência. Por exemplo, a descoberta do fogo, utilizando o atrito entre pedras ou madeiras, produzindo faíscas e as técnicas de como controlá-lo, no período Paleolítico pelo *Homo Erectus*, cerca de sete mil anos a.C., e posteriormente as técnicas de talhar a pedra para construir objetos arredondados com o intuito de facilitar a locomoção, resultando na invenção da roda, foram fatores determinantes para a sobrevivência e evolução humana (COTRIN, 2002).

Os primeiros estudos e projetos de experimentos mais detalhados em relação ao atrito foram realizados pelo italiano Leonardo da Vinci (1452-1519). Em seus trabalhos relacionados a esse assunto, ele usa o termo *confregazione*

(esfregamento), como sendo uma força requerida para diminuir o movimento (VINCI, 1940).

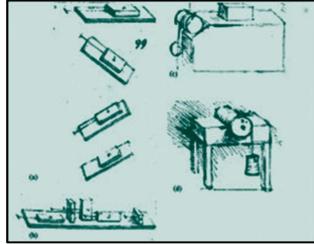


Figura 1.1. Esboços dos modelos experimentais desenvolvidos por Da Vinci.
(VINCI, sd)

Verificamos, figura 1.1 (VINCI, sd), nos aparatos a diversificação utilizada pelo mestre italiano em tentar observar, sob vários aspectos, os fatores que podiam influenciar o atrito, desde os estudos em superfícies planas e inclinadas até em rolamentos e deslizamentos de objetos de formatos cilíndricos e retangulares. Com os dados obtidos em seus experimentos, Da Vinci chegou às seguintes conclusões em relação ao atrito e sistemas mecânicos:

- I. A força de *esfregamento* depende da natureza dos materiais em contato;
- II. A força de *esfregamento* depende do grau de acabamento das superfícies em contato;
- III. A força de *esfregamento* depende da presença de um fluido ou outro material interposto entre as superfícies;
- IV. A força de *esfregamento* aumenta com a pressão aplicada por um corpo contra o outro.

Podemos perceber uma ótima aproximação das ideias de Da Vinci com as definições atualmente defendidas em relação ao atrito. Mas, infelizmente, suas contribuições foram registradas em anotações individuais, não sendo, assim, oficialmente registradas pela comunidade científica na época (SINATORA, 2007).

Após mais de 200 anos, com os estudos do francês *Guillaume Amontons* (1663-1705), o atrito foi mais bem definido. Amontons chegou à conclusão de que materiais diferentes apresentam valores de atrito diferentes e que o atrito é causado pela interferência entre asperezas existentes nas superfícies dos materiais. Posteriormente, outro francês contribuiu para os estudos de Amontons: *Charles Augustin de Coulomb* (1736-1806). Este determinou que, durante o deslizamento, o atrito é independente da velocidade relativa entre as superfícies. As ideias de ambos foram aceitas, e ficaram conhecidas como os estudos de Amontons-Coulomb (AC), sendo válidas até hoje, para experimentos na escala macroscópica. A partir disso, foram enunciadas “As Leis do Atrito” segundo AC, em que as usualmente mais aceitas são:

1ª Lei do Atrito: A força de atrito é proporcional à *força normal* (Força de contato entre superfícies, tendo direção perpendicular às superfícies envolvidas).

2ª Lei do Atrito: A força de atrito é independente da área aparente de contato.

3ª Lei do Atrito: A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.

Portanto, a definição matemática para corpos em movimento relativo e postos em contato, de acordo com a primeira Lei do Atrito, é dada por:

$$\mu = \frac{F_{\text{atrito}}}{F_{\text{normal}}}, \quad [1]$$

onde μ é uma constante de proporcionalidade chamada de coeficiente de atrito. A Figura 1.2 sugere, através da experimentação, a proporcionalidade entre a força de atrito e a força normal entre superfícies. Os valores mostrados são de um deslizamento não lubrificado, em ar, entre aço e alumínio polido.

Percebemos que o coeficiente de atrito não apresenta variação regular, sendo ajustada por uma reta horizontal, quando a força normal é aumentada 6 décadas (em Newtons). (BOWDEN E TABOR, 1950).

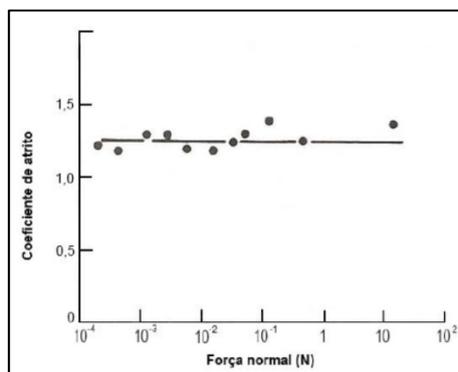


Figura 1.2. Dependência do coeficiente de atrito com a força normal para o deslizamento não lubrificado, em ar, entre aço e alumínio polido. (BOWDER e TABOR, 1950).

A segunda Lei do Atrito diz que a intensidade da força de atrito independe da área aparente, pois, em nível microscópico, as superfícies tocam-se em apenas alguns pontos, onde a área total desses pontos é definida como área efetiva, sendo esta muito menor que a área aparente. Quando as superfícies são comprimidas, uma na outra, aumenta a intensidade da força normal e com isso, o número de pontos microscópicos em contato também aumenta, aumentando, assim, a área efetiva, de maneira proporcional, mesmo mantendo inalterada a área aparente. Logo, a intensidade máxima da força de atrito dependerá do número de pontos de contato entre os dois sólidos, ou seja, depende da área efetiva que, por sua vez, dependerá da “compressão” entre as superfícies. Estudos recentes indicam que a segunda lei do Atrito é adequada para a maioria dos materiais, mas com exceção dos polímeros. Para esses materiais o coeficiente de atrito depende de vários fatores, como a velocidade de escorregamento, a temperatura e a umidade, e nessas condições fica inadequado criar uma lista de valores de coeficiente de atrito (KAWAKAME e BRESSAN, 2000). A figura 1.3 mostra que o coeficiente de atrito permanece praticamente constante, à medida que a área efetiva de contato é aumentada. Os valores mostrados são para madeira contra aço não lubrificado, conforme prevê a segunda lei (RABINOWICZ, 1965).

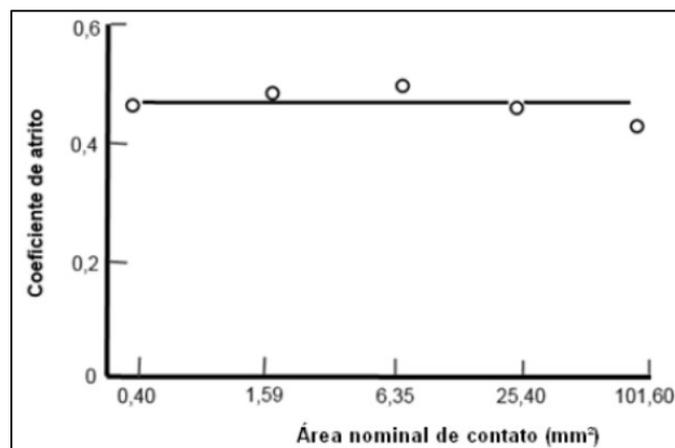


Figura 1.3. O coeficiente de atrito permanece praticamente constante à medida que a área efetiva é aumentada. Valores para madeira contra aço não lubrificado (RABINOWICZ, 1965).

A terceira Lei do Atrito ainda não está bem esclarecida, visto que as conclusões de Coulomb foram predominantemente experimentais. Ele percebeu que a força necessária para iniciar um deslizamento é geralmente maior do que aquela necessária para mantê-lo, chegando à conclusão de que o coeficiente de atrito estático é maior que o coeficiente de atrito cinético.

Em 1929, o físico inglês G. A. Tomlinson (1929) propôs outra hipótese para a origem do atrito. Segundo ele, enquanto uma superfície desliza sobre outra, os átomos que compõem essas estruturas interagem e vibram. Essa vibração dará origem ao atrito. Contudo, essa hipótese teve pouca aceitação, já que na época existia a impossibilidade da verificação experimental.

Já em 1950, *Bowden e Tabor* (1950) formularam a seguinte hipótese: devido à proximidade entre as moléculas dos materiais em contato, nas pequenas regiões em que efetivamente ocorre o toque, surgem forças eletromagnéticas de adesão que “soldam” microparcelas das superfícies que, de fato, estão em contato. Assim, quando uma superfície é arrastada sobre a outra, ocorrem sucessivas “soldas”, rupturas e deslizamentos, em um processo conhecido por *stick-slip*, que dá origem à força (macroscópica) de atrito. Esse modelo para o atrito pôde ser estudado experimentalmente com o uso de microscópios de força atômica e de tunelamento, de microbalanças que permitem medir forças de interação extremamente pequenas entre átomos das superfícies.

Por volta dos anos 60, o engenheiro britânico *H. Peter Jost* publicou um relatório destacando o custo do atrito, do desgaste e da corrosão para a economia do Reino Unido (H.P. Jost, 1962). Nesse relatório, Jost utilizou o termo “Tribologia” pela primeira vez, e passou a ser o termo mais utilizado a partir disso, no que diz respeito aos estudos nessa área da ciência. A palavra Tribologia é derivada do Grego, *tribos*, e significa atrito, sendo denominada a ciência do atrito. Os estudos da redução do atrito entre os corpos, ou das consequências deste fenômeno, envolvem os mais diversos ramos da ciência. Tanto nas mais avançadas aplicações tecnológicas (indústrias automobilística, aeroespacial, petrolífera, informática e telecomunicações), como em outras áreas da ciência (medicina, odontologia, música, ergonomia), procuram-se entender quais são os mecanismos responsáveis pelo atrito e de que forma este fenômeno pode afetar o funcionamento do sistema, aumentando a sua eficiência, reduzindo custos e até ocasionando uma melhoria na qualidade de vida da sociedade (HUTCHINGS, 2001).

Portanto, os fenômenos do atrito ainda não estão completamente entendidos e são particularmente complexos, pois dependendo do sistema mecânico, possuem efeitos e causas diferentes. No entanto, as leis elaboradas por Amontons e Coulomb continuam sendo aceitas dentro de certas limitações experimentais nas quais são aplicadas. Serão essas leis que utilizaremos neste referido trabalho.

Durante a evolução nos estudos do atrito, foram surgindo vários experimentos com o intuito de exemplificar seus efeitos em sistemas mecânicos, desde escalas microscópicas até grande escala, já que esse fator está presente em praticamente todas as superfícies. Um exemplo simples de experimento que demonstra o grande efeito causado pelo atrito é o da separação de duas listas telefônicas intercaladas. Consiste em unir duas listas telefônicas através das suas folhas, alternando a superposição das folhas de uma das listas com a outra, como mostra a figura 1.4. A escolha de listas telefônicas deve-se ao fato, principalmente, de possuírem um número elevado de folhas. Feito isso, o objetivo da demonstração é tentar separar as listas puxando cada uma para um lado, mas o interessante é que a força necessária para separá-las torna-se tão elevada que dificilmente o objetivo é alcançado.

Esse experimento já foi reproduzido várias vezes e mostrado em canais de TV e Internet, sob várias formas, com o intuito de solucionar o enigma da separação.



Figura 1.4. Intercalação de folhas entre dois livros

Em 2008 a série *MythBusters* (Caçadores de Mitos) do canal de televisão *Discovery Channel*, exibiu o episódio “*Phone Book Friction*”, utilizando duas listas telefônicas com 400 folhas, cada, a equipe do programa tentou separar as listas com um número crescente de pessoas e depois com um carro, mas sem sucesso. Foi então que eles utilizaram dois tanques militares para o objetivo, conseguindo alcançar aproximadamente 3,6 toneladas-força. A separação ocorreu de fato, porém em condições ainda não satisfatórias, pois algumas folhas foram parcialmente rasgadas antes da separação (MYTHBUSTERS-YOUTUBE, 2018).

O canal de *YouTube Manual do Mundo*, também tentou realizar a separação das listas, com várias pessoas puxando e, posteriormente, com dois carros, mas do mesmo modo não conseguiram; as listas rasgam antes (MANUAL1-YOUTUBE, 2018). Por sinal, a explicação dada por esse canal à dificuldade de separação das listas é equivocada, visto que o argumento utilizado é a grande área total encontrada quando somadas todas as áreas individuais das folhas; entretanto vimos anteriormente que o atrito não tem dependência com a área aparente das superfícies (MANUAL2-YOUTUBE, 2018). O mesmo resultado pode ser visto em outro vídeo encontrado na internet, onde foram usados dois caminhões, chegando a uma força de 2 toneladas-força (DAVID WILLEY-YOUTUBE, 2018).

Já em maio de 2014, no canal de televisão francês *France 5*, foi ao ar o episódio do programa *On n'est pas que des cobayes* (Não Somos Só Cobaias) com outra tentativa de separação das duas listas telefônicas intercaladas. Na oportunidade, a equipe conseguiu erguer um carro de 600 quilogramas até uma altura de 6 metros, onde entre o braço do guindaste e o carro foram colocadas as listas com suas folhas intercaladas. Mas o que chama a atenção nesse momento é o convite que o programa fez a um grupo de físicos para tentar desvendar os mistérios por trás do poder impressionante do atrito, principalmente nesse contexto experimental. O resultado desse desafio foi publicado em forma de artigo (que será comentado mais detalhadamente no capítulo 3 desta dissertação), na conceituada revista científica *Physical Review Letters*, com o título “*Self-Amplification of Solid Friction in Interleaved Assemblies*”. Alguns autores desse mesmo artigo publicaram o trabalho também na *Physics Today*, onde adotaram o termo “*número de Hércules*” para o coeficiente adimensional α encontrado em seu modelo teórico, sendo este o fator matemático principal para o “poder” do atrito na tentativa de separação das listas telefônicas intercaladas (ALÁRCON, 2016).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O ensino de qualquer disciplina é algo de muita complexidade, em que vários fatores interferem de maneira positiva e negativa no processo. Portanto, para transpor essas dificuldades, o professor pode recorrer, além de outras alternativas, às teorias de aprendizagem no auxílio de sua prática. Existem várias teorias defendidas por muitos estudiosos, podendo uma ou outra se adequar melhor a determinada filosofia de trabalho e contexto.

Como não é possível, na maioria das vezes, ter ciência de todos os fatores que influenciam determinado aluno a querer e conseguir aprender certo conteúdo, então, é necessário adotar caminhos que minimizem o difícil acesso a esses fatores. E um dos passos iniciais nessa tentativa é tentar identificar quais são os conhecimentos prévios que ele já possui acerca do conteúdo proposto, pois a partir desse levantamento o professor terá algumas condições favoráveis para iniciar sua prática. Esses conhecimentos prévios acerca de determinado conceito, proposição, modelo mental, símbolo ou imagem, David Ausubel (1918-2008) chamava de *subsunçor* ou *ideia-âncora* (MOREIRA, 2006).

Segundo Ausubel, a aprendizagem significativa se caracteriza pela interação ou *ancoragem* entre conhecimentos prévios e conhecimentos novos, e que haja uma predisposição por parte do discente para que isso aconteça. Nesse processo, os novos conhecimentos adquirem significado para o sujeito e os conhecimentos prévios adquirem novos significados ou maior estabilidade cognitiva, dentro de um processo puramente dinâmico. Ou seja, o ponto chave na aprendizagem significativa é a transformação e consolidação de significados continuada. O *subsunçor* ficará mais rico, facilitando em novas aprendizagens, auxiliando, acima de tudo, a capacidade do sujeito de resolver problemas diferentes sem grandes dificuldades. Portanto, a tendência de um aluno esquecer totalmente o conhecimento adquirido é muito menor, já que na aprendizagem significativa o esquecimento parcial, chamado por Ausubel de assimilação obliteradora, é normal. Mas o resgate desse conhecimento perdido se dá de maneira mais tranquila e rápida, diferentemente do ensino tradicional

mecânico, em que a possibilidade de perda total do conhecimento é praticamente certa de ocorrer, uma vez que essa prática se resume em copiar, memorizar, reproduzir e esquecer, sem construção de significados entre os conceitos, sendo o conhecimento construído de maneira fragmentada, fazendo com que indivíduo resolva situações-problemas já conhecidas e sem a reaprendizagem. Logo, as vantagens em se utilizar o modelo ausubeliano são a compreensão, o significado, a capacidade de transferência a situações novas, maior retenção e na possibilidade de reaprendizagem em muito menos tempo do que a aprendizagem mecânica (MOREIRA, 2006). Portanto, percebendo a importância dos *subsunçores* no processo de aprendizagem, este presente trabalho terá a aprendizagem significativa como base teórica na sua elaboração.

Ausubel ainda afirma que o conhecimento prévio ou *subsunçor* é a variável isolada mais importante para a aprendizagem significativa de novos conhecimentos, mas isso não significa que ele será a variável facilitadora no processo de aprendizagem, pois dependendo da forma como será conduzida, pode se tornar um agente bloqueador no aprendizado. Essencialmente, são duas as condições para a aprendizagem significativa: o material de aprendizagem deve ser potencialmente significativo e o aprendiz deve apresentar uma predisposição para aprender. Ou seja, o material deve ter relação com a estrutura cognitiva do aluno e este deve ter o conhecimento prévio necessário (MOREIRA, 2006).

A construção de um material potencialmente significativo não gerará um material propriamente significativo; o significado está no aluno, não no material. O que ocorre é uma interação entre material e aluno, uma construção, às vezes demorada, de significados. A aprendizagem significativa é progressiva, a captação, a internalização, a diferenciação e a reconciliação de significados não ocorrem de maneira imediata, pois temos quebras e continuidades ao longo do processo (MOREIRA, 2006).

Outro ponto importante no processo de aprendizagem é o método de avaliação. A avaliação da aprendizagem significativa se preocupa com a compreensão, captação de significados, capacidade de transferência do conhecimento a situações não-conhecidas. Mas como o processo é

progressivo, a avaliação também deve ser feita na mesma forma. Segundo Ausubel, a melhor maneira de avaliação é propor ao indivíduo uma situação nova, requerendo máxima transformação do conhecimento adquirido. Embora que, isso é possível se todo o caminho percorrido durante a aprendizagem tenha se dado de maneira significativa. Não adianta parte do processo se dar em modelo mecânico e outra não. É preciso uma modificação em toda a estrutura filosófica e ativa do ensino. Claro que nessa avaliação é necessária a externalização do aluno sobre o que ele está construindo e relacionando, e se for necessário, repetir mais de uma vez até que as evidências de um aprendizado significativo surjam, pois é mais adequado do que tentar determinar se o aprendizado significativo ocorreu de fato ou não (MOREIRA, 2006).

Visto isso, a implementação da aprendizagem significativa não é tarefa fácil e rápida, principalmente no contexto do atual sistema de ensino em que a aprendizagem mecânica é um modelo quase consolidado, mas possível de ser modificado. Essa mudança não iniciará apenas com novas metodologias; depende de novas posturas e filosofias de todos aqueles que fazem parte desse sistema atualmente predominante. Portanto, o que será executado neste trabalho é apenas uma parte de um processo que é bastante longo. Não temos o objetivo de inserir a qualquer custo o aprendizado significativo; afinal, como já foi citado neste texto, uma única metodologia para trabalhar um tópico específico de Física em poucos encontros e em um meio mecanicista de aprendizagem não é o suficiente. Desejamos demonstrar a efeitos práticos, mesmo que limitados e reduzidos, os benefícios da aprendizagem que a aprendizagem significativa pode oferecer. Para aqueles que tiverem acesso a este trabalho, realizarem suas análises de acordo com a nossa experiência.

Como vimos, a partir do conhecimento dos *subsunçores* dos alunos, podemos traçar estratégias de ensino e uma delas poderá ser o uso de ferramentas tecnológicas. Diante da realidade de um ensino mecânico, com linguagens praticamente restritas ao verbalismo e escrita, a necessidade de novas metodologias e ferramentas de ensino é evidente. As possibilidades são muitas (sites na internet, simuladores virtuais, filmes, videoaulas, laboratórios

virtuais, aplicativos,...) e dependendo dos objetivos da aula, algumas são mais adequadas e outras não.

Porém, a utilização de qualquer ferramenta metodológica requer alguns cuidados: seu uso de maneira exaustiva e repetitiva faz com que a aula se torne monótona, o aluno adquire antipatia e conseqüentemente desmotivação em querer aprender, mesmo se tratando de tecnologias, já que muitos dos alunos nos dias atuais possuem acesso a várias formas delas. Elas devem ser utilizadas de acordo com os propósitos educacionais e estratégias adequadas para propiciar uma aprendizagem, sem informatizar o ensino, pois assim reduz as tecnologias a meros instrumentos para instruir o aluno. No processo de inclusão das tecnologias na escola, aprendemos a lidar com a diversificação, com o leque de possibilidades e a rapidez de acesso às informações, bem como com novas possibilidades de comunicação e interação, o que acarreta novas formas de aprender, ensinar e produzir conhecimento. Segundo Almeida (ALMEIDA, 2005):

“Inserir-se na sociedade da informação não quer dizer apenas ter acesso à tecnologia de informação e comunicação (TIC), mas principalmente saber utilizar essa tecnologia para a busca e a seleção de informações que permitam a cada pessoa resolver os problemas do cotidiano, compreender o mundo e atuar na transformação de seu contexto. Assim, o uso da TIC com vistas à criação de uma rede de conhecimentos favorece a democratização do acesso à informação, a troca de informações e experiências, a compreensão crítica da realidade e o desenvolvimento humano, social, cultural e educacional”(ALMEIDA, 2005)

Dentro desse contexto, uma das formas de tecnologias possível de ser utilizada é o vídeo. Ele pode ser útil em diversas situações, tais como na introdução de novos conteúdos, despertar a curiosidade e motivação, simular experiências que não podem ser executadas por falta de estrutura na escola, ou seja, simular situações que os alunos não têm facilidade no acesso, sendo uma ferramenta barata, acessível e dinâmica, promovendo uma interrupção nos métodos tradicionais de ensino.

Porém, essa ferramenta educacional deve ser utilizada de maneira inteligente para não comprometer a compreensão dos discentes durante o processo de ensino e aprendizagem, pois em alguns momentos ela é usada de maneira inadequada na sala de aula, seja para passar o tempo por conta da falta de um professor, seja por abordar determinado conteúdo sem estar de acordo com o conteúdo da disciplina naquele momento, ou por ser usada repetitivas vezes como única ferramenta dinâmica na prática docente, apenas para ser visto e não debatido ou questionado. (MORAN, 1994).

Segundo PAZZINI (2013):

“No mundo globalizado é preciso interagir com as novas tecnologias para que os alunos convivam com o mundo conectado. O papel da mídia é fundamental para que sejam incorporadas as novas atitudes cotidianas de forma prazerosa. É muito importante o processo de humanização das tecnologias, pois são meios que facilitam o processo de aprendizagem”(PAZZINI, 2013)

Então, os alunos devem ser inseridos nesse meio de informações e tecnologias para resolver problemas que ocorrem no cotidiano, o professor sendo mediador, buscando criar justificativas que sejam interessantes para os alunos no uso dessas ferramentas, tornando uma aprendizagem significativa, desafiadora, problematizadora e instigante, a ponto de mobilizar o aluno a buscar soluções possíveis para serem discutidas e concretizadas por meio de referenciais teóricos e práticos. A práxis docente inovadora precisa contemplar a instrumentalização dos diversos recursos disponíveis, como o uso de vídeos, formando um processo para aprender de forma criativa, dinâmica, encorajadora que tenha como essência o diálogo e a descoberta. (BEHRENS, 2005)

Dentro dessa perspectiva, um dos momentos do nosso trabalho, e o mais importante, é a utilização de um vídeo de autoria própria onde apresentamos um estudo publicado em revista científica sobre o atrito entre folhas intercaladas de duas listas telefônicas, tópicos do conteúdo sobre atrito e como anexo uma proposta pedagógica experimental. O vídeo será disponibilizado na internet com sugestões de abordagem para apresentar uma situação-problema e como construir o aparato que utilizamos no nosso estudo.

Em relação aos cálculos desenvolvidos para a construção do nosso modelo matemático, tivemos a preocupação para que eles possam ser compreendidos e reproduzidos por estudantes do ensino médio com conhecimentos prévios em atrito. Para isso, temos como referências as leis de Amontons-Coulomb (*leis AC*) para a definição do atrito entre as superfícies das folhas, pois estes são os conceitos presentes no programa atual do ensino de física no ensino médio.

Os franceses Amontons e Coulomb afirmaram que os valores de atrito dependem dos materiais em contato, e que o atrito é causado pelas irregularidades presentes nas superfícies. Complementando que o atrito não depende da velocidade relativa entre as superfícies. A partir disso, foram enunciadas as leis do atrito segundo AC, em que as usualmente mais aceitas são:

1ª Lei do Atrito: A força de atrito é proporcional à *força normal* (força de contato entre superfícies, tendo direção perpendicular às superfícies envolvidas).

2ª Lei do Atrito: A força de atrito é independente da área aparente de contato.

3ª Lei do Atrito: A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.

Portanto, de acordo com a primeira lei do atrito,

$$\mu = \frac{F_{\text{atrito}}}{F_{\text{normal}}}, \quad [1]$$

onde μ é uma constante de proporcionalidade chamada de coeficiente de atrito que podemos associar às irregularidades entre as superfícies. Este coeficiente pode ser classificado como estático, quando não há o deslizamento entre as superfícies, ou dinâmico quando as superfícies se movem uma em relação à outra.

Então podemos definir três pilares para a fundamentação teórica deste trabalho: O primeiro sendo a utilização da teoria de aprendizagem significativa de Ausubel, o segundo sendo o uso de uma tecnologia de informação e comunicação (TIC's) como produto educacional e o terceiro pilar são as leis AC do atrito com tipo de abordagem compreensível para alunos de nível médio e professores, sendo este o nosso público alvo.

3 MODELO DE ALÁRCÓN E COLABORADORES

O experimento para a separação de duas listas telefônicas intercaladas sempre chamou atenção pela simplicidade estrutural e efeito surpreendente da força de atrito devido às intensidades altas que ela pode adquirir. Várias são as fontes disponíveis na internet de reprodução desse experimento, como a realizada pela emissora de televisão francesa *France 5* em um dos episódios do programa *On n' est pas que des cobayes* (Não Somos Só Cobaias), que foi ao ar em maio de 2014.

Nesse episódio, a equipe do programa conseguiu erguer um carro de 600 quilogramas até 6 metros de altura, colocando entre o carro e o braço do guindaste as listas telefônicas intercaladas. Para aqueles que já se depararam com outras situações em que as listas se submetiam a grandes forças de separação, esse exemplo da TV francesa não é dos melhores nesse aspecto de intensidade de força envolvida. Mas parte interessante desse episódio foi o convite que a equipe de TV realizou a um grupo de físicos com o intuito de tentar desvendar o enigma da inseparabilidade das listas telefônicas. Em Janeiro de 2016, a resposta desse problema foi publicada como artigo científico na conceituada revista *Physical Review Letters (PRL)* e entre os autores deste artigo estão alguns que participaram do programa de TV.

No texto desse trabalho divulgado na PRL são apresentados vários pontos: o problema da separação das listas telefônicas intercaladas, um breve apanhado histórico da tribologia, o modelo teórico defendido por eles como sendo a resposta para o enigma da separação e a relação desses estudos em outras áreas da ciência. Portanto, vamos nos deter a fazer uma análise dos métodos de realização da parte experimental e do modelo teórico encontrado.

3.1 EXPERIMENTO REALIZADO POR ALÁRCÓN E COLABORADORES

No experimento realizado pelos autores do artigo científico, as folhas intercaladas foram presas em suas extremidades por braçadeiras que eram

puxadas com força paralela a elas e de módulo F . No esquema de montagem foram definidas três regiões: A primeira região onde estão as braçadeiras e as folhas de um dos grupos se tocam umas nas outras praticamente na vertical. A terceira região é chamada de zona de contato, onde as folhas de um dos lados estão tocando as folhas do outro de maneira intercalada. E a segunda região é a transição entre a primeira e terceira regiões. Nela encontramos apenas folhas de um dos lados e uma deformação (“lombada”) no formato das folhas (desvio), quer dizer, não são paralelas em relação à primeira e terceira regiões. Todo o aparato foi disposto verticalmente, sendo a braçadeira inferior presa a um suporte e a superior sendo puxada para cima pela força de módulo F , veja figura 3.1.

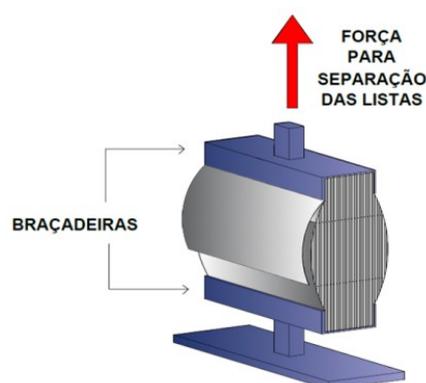


Figura 3.1. Representação do aparato utilizado pelos autores do artigo da PRL enfatizando a localização das braçadeiras.

3.2 MODELO TEÓRICO ELABORADO POR ALÁRCÓN E COLABORADORES

Quando a braçadeira superior é puxada com força de módulo F , dependendo da intensidade dessa força pode não haver deslizamento entre as folhas, pois o atrito entre as superfícies depende do coeficiente de atrito estático e da força com que as superfícies são pressionadas umas contra as outras. Quando a força que puxa as listas consegue vencer o efeito da força de atrito estático máxima, as folhas são então movidas.

De acordo com o modelo teórico apresentado no trabalho divulgado na PRL, a dificuldade em conseguir separar as listas deve-se a dois fatores:

1. Na região de contato (3ª região) existe o atrito entre as superfícies das folhas paralelas e intercaladas, que impede a separação delas até que seja atingida a força de atrito estático máxima.

2. Fazendo uma análise da parte esquerda da figura 3.2: À medida que o conjunto é puxado para a esquerda por uma força de intensidade F , as folhas da região intermediária (2ª região), devido ao desvio que elas sofrem, são puxadas para a esquerda na mesma direção da força F e para baixo, aumentando a força que uma folha pressiona outra localizada logo abaixo (da outra lista) na região de contato. Isto irá aumentar a intensidade da força de atrito entre as folhas, dificultando ainda mais a tentativa de separação.



Figura 3.2. Esquema mostrando as três regiões: a 1ª região, onde está localizada a braçadeira, contém folhas empilhadas de um único bloco; a 2ª região é constituída de um único grupo de folhas, mas com uma deformação (desvio) causada pelas braçadeiras; e a 3ª região é chamada, segundo os autores, de zona de contato, e indica o local onde um dos grupos de folhas está em contato com o outro grupo de forma intercalada. A distância d é a distância de separação entre a extremidade livre do bloco de folhas (indicada pela linha pontilhada) de um dos lados e a braçadeira do lado oposto.

Visto isso, os autores fizeram uso do equipamento *Adamel Lhomargy DY32* em que a força de tração nos grupos era regulada com precisão, podendo assim construir gráficos que descrevem o comportamento da força de separação com ótima precisão. Nesse levantamento eles conseguiram observar a veracidade do efeito *stick-slip* entre as superfícies à medida que elas eram puxadas, além de comprovar também a não dependência desses valores com a velocidade de deslizamento. No artigo eles divulgam os gráficos obtidos e detalham o procedimento para obtenção do modelo teórico através de um material suplementar.

Nesse modelo, a expressão da força T para separar os grupos de folhas intercaladas é dada por:

$$T = 2MT^* \sqrt{\frac{\pi}{4\alpha}} \exp(\alpha) \operatorname{erf}(\sqrt{\alpha}), \quad [2]$$

onde $2M$ indica o número total de folhas empilhadas, T^* é considerada a força de tensão em uma única folha e $\operatorname{erf}(\sqrt{\alpha})$ é uma função chamada de função erro, encontrada durante a construção matemática para obter a expressão. Verificamos a dependência de T com um parâmetro adimensional α , que segundo os autores é o ponto central do estudo. Esse mesmo parâmetro foi chamado pelo autor de um artigo publicado pela revista *Improbable Research* de “número de Hércules” (IMPROBABLE, 2018) - em referência ao herói da mitologia grega conhecido por sua força - e que posteriormente foi adotado pelos autores do artigo da PRL. O “número de Hércules” foi definido matematicamente como:

$$\alpha = \mu\epsilon N^2 / 2d, \quad [3]$$

em que μ é o coeficiente de atrito estático entre as folhas, ϵ é a espessura de uma folha, N é o número de folhas em cada grupo, e d é a distância de separação que corresponde à distância entre a extremidade livre de um dos grupos de folhas e as braçadeiras, ver Figura 3.2.

Realizando uma breve análise das equações [2] e [3], podemos chegar às seguintes conclusões:

- 1 A distância de separação d será menor se o desvio que as folhas sofrem por conta das braçadeiras for maior. Ou seja, se as folhas na segunda região estiverem mais inclinadas, o valor de d diminui.
- 2 A diminuição no valor de d fará com que o parâmetro α aumente.
- 3 Aumentando o valor do parâmetro adimensional α , a intensidade da força T para separar os grupos de folhas aumentará rapidamente. Pois há uma dependência exponencial de T com o termo α .

Portanto, segundo o modelo matemático encontrado por Alárcon, o fator primordial para as grandes intensidades de força da separação dos grupos de folhas intercaladas advém desse desvio sofrido pelas folhas na segunda região, fato esse que ocorre por conta da presença das braçadeiras. Esse mesmo desvio faz também com que uma folha ao ser puxada na direção de T, pressionará para baixo a folha localizada logo abaixo dela do outro grupo na região de contato, aumentando a força normal entre as superfícies e conseqüentemente a força de atrito.

3.3 PONTOS QUE NÃO FORAM DISCUTIDOS POR ALÁRCÓN E COLABORADORES

Após a análise de toda a produção realizada e argumentos defendidos no trabalho divulgado na PRL, percebemos que os autores não levaram em consideração a possibilidade de tentar reproduzir o experimento na horizontal com a força gravitacional atuando de maneira direta na intensidade do atrito entre as folhas e sem o uso das braçadeiras, pois por conta delas surgiu o desvio das folhas e conseqüentemente o aparecimento do parâmetro α , sendo este, segundo os autores, o parâmetro central relacionado à quase inseparabilidade das folhas intercaladas, afirmando ainda que sem os desvios nas folhas a separação das listas ocorre facilmente.

Visto isso, a defesa do argumento de que o número de Hércules é o único responsável pela grande dificuldade em separar folhas intercaladas só poderia ser mais contundente se tivessem realizado outro procedimento sob condições diferentes. Com os valores obtidos nesse novo modelo, fazer um comparativo e, assim, poder argumentar categoricamente a influência do parâmetro α no efeito sobre as listas. Mas não encontramos possibilidades de estudos futuros ou menções no texto do trabalho nesse aspecto, pelos autores.

Portanto, nossa proposta é elaborar uma expressão para a força F de separação à luz dos conhecimentos de física e matemática com certa acessibilidade, podendo ser elemento de estudos para alunos de nível médio, e

ao mesmo tempo que possa analisar em alguns aspectos a verdadeira importância ou não do número de Hércules para as grandes forças de separação de duas listas telefônicas com suas folhas intercaladas.

3.4 MODELO TEÓRICO

Como vimos em capítulos anteriores deste trabalho, os estudos de tribologia são bastante amplos e com muitas dúvidas ainda para serem esclarecidas. Alguns estudiosos defenderam pontos de vista diferentes no que diz respeito ao que influencia o atrito e como ele é gerado. Certos modelos se adequam a determinadas condições e em outras ocorrem divergências e limitações. Nesse referido trabalho, optamos por utilizar as chamadas Leis do Atrito propostas pelos franceses Amontons e Coulomb, já que, segundo alguns estudos, essas leis são adequadas para experimentos na macroescala com boas aproximações, e também pelo fato de que elas são as utilizadas no ensino de física a nível básico.

Recapitulando, as Leis do Atrito dizem que o módulo da força de atrito é proporcional ao módulo da força normal entre as superfícies e que o coeficiente de atrito faz é a constante de proporcionalidade nessa relação. Portanto:

$$F_{ATRITO} = \mu \cdot F_{NORMAL} \quad [4]$$

Em relação ao nosso aparato experimental, dispusemos as folhas na horizontal uma sobre as outras de maneira intercalada sem prendê-las por braçadeiras, deixando-as livres, onde uma pressionava a outra apenas devido à força gravitacional (ver figura 3.3).

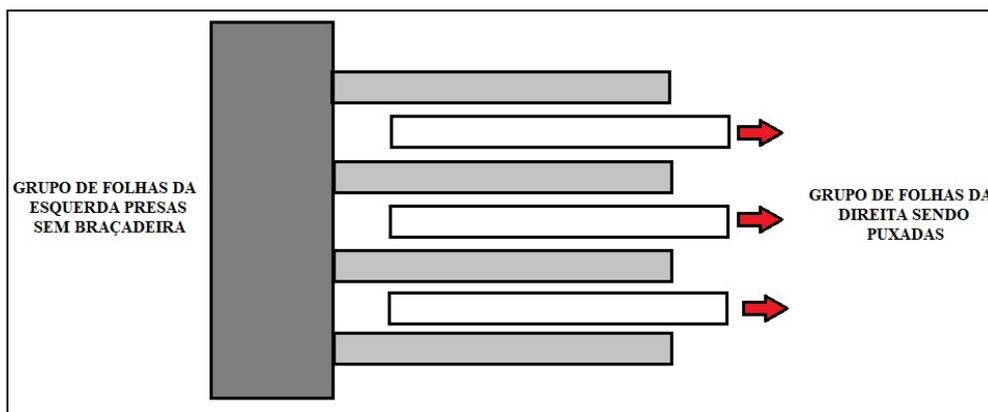


Figura 3.3. Esquema do nosso aparato mostrando a disposição das folhas intercaladas

Um dos grupos com $N+1$ folhas foi preso no aparato fixado a uma parede e o outro grupo com N folhas foi puxado por força de módulo F . Analisando uma folha presente no grupo que será puxado, veremos que em cada superfície – superior e inferior – atuarão forças de atrito de módulos diferentes, pois as forças normais nessas superfícies são diferentes. Denotando o módulo da força de atrito estático máximo inferior por f_i e o módulo da força de atrito estático máximo superior por f_s , teremos no momento da iminência do movimento,

$$F = f_i + f_s \quad [5]$$

Estamos afirmando na equação acima que ainda não houve o deslizamento entre as superfícies, isso somente ocorrerá quando F for maior que a soma de f_i e f_s . Analisando uma folha arbitrária do grupo que será movido, veremos que a intensidade da força normal na superfície inferior é igual ao peso dela mg e de todas as folhas acima. Já a intensidade da força normal na superfície superior é equivalente apenas ao peso das folhas acima dela. Lembrando que todas as folhas são idênticas, ou seja, possuem a mesma massa. Para uma folha qualquer do grupo móvel, a intensidade da força F é dada pela expressão [6].

$$F = f_{at,inf} + f_{at,sup} \quad [6]$$

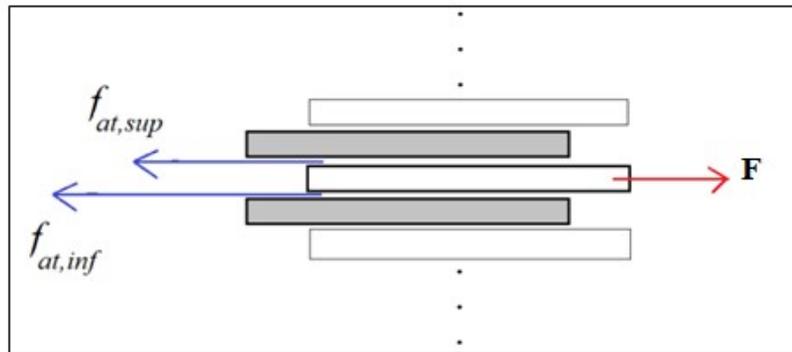


Figura 3.4. Esquema da disposição das folhas intercaladas. As folhas na cor branca representam as que serão puxadas pelo operador e as folhas na cor cinza são as que ficarão presas no aparato.

No nosso esquema experimental tivemos o cuidado da última folha da parte de cima ser do grupo de folhas que está fixo na parede. Para um conjunto com 2 folhas cinzas e uma branca, temos a seguinte relação matemática:

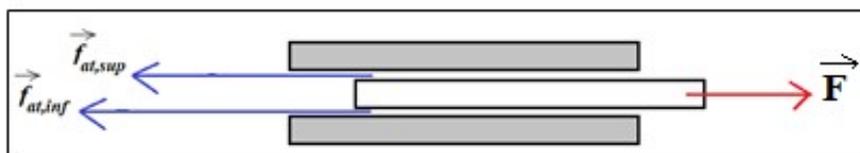


Figura 3.5. Esquema com uma folha móvel (branca) e duas fixas (cinza).

$$F = f_{at,inf} + f_{at,sup}$$

$$F = [2mg \cdot \mu] + [1. mg \cdot \mu]. \quad [7]$$

Para um esquema com 3 folhas cinzas e 2 brancas, temos:

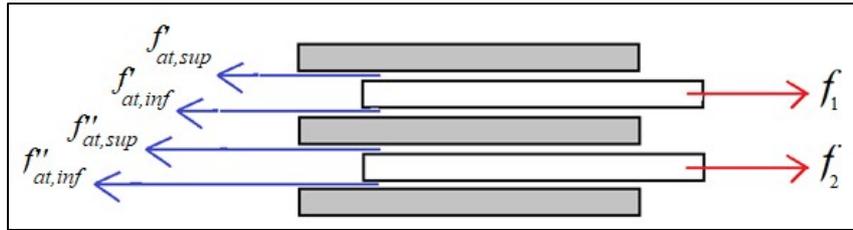


Figura 3.6. Esquema com duas folhas móveis (branca) e três fixas (cinza).

$$F = f_1 + f_2 = f''_{at,inf} + f''_{at,sup} + f'_{at,inf} + f'_{at,sup}$$

$$F = [4mg \cdot \mu] + [3 \cdot mg \cdot \mu] + [2 \cdot mg \cdot \mu] + [1 \cdot mg \cdot \mu] \quad [8]$$

Analogamente, para um esquema com 4 folhas cinzas e 3 folhas brancas, teremos a expressão:

$$F = f''_{at,inf} + f''_{at,sup} + f'_{at,inf} + f'_{at,sup} + f_{at,inf} + f_{at,sup}$$

$$F = [6mg \cdot \mu] + [5 \cdot mg \cdot \mu] + [4 \cdot mg \cdot \mu] + [3 \cdot mg \cdot \mu] + [2 \cdot mg \cdot \mu] + [1 \cdot mg \cdot \mu] \quad [9]$$

Se mantivermos essa análise com o número de folhas intercaladas aumentando e sempre deixando por último uma folha do grupo cinza iremos perceber um padrão na expressão para F . Perceba que a sequência dos termos é uma soma com coeficientes crescentes, em que o primeiro termo possui coeficiente que equivale a 1 o coeficiente do último termo é o número total de folhas empilhadas N menos um ($N-1$). Outra observação que podemos fazer é que os coeficientes indicam uma sequência que se comporta como uma progressão aritmética (P.A.) com seus termos sendo somados. Logo, existe uma soma de elementos de uma progressão aritmética de razão 1. Então, podemos reduzir a expressão [9] ao seguinte formato:

$$F = mg\mu\{(N - 1) + (N - 2) + \dots + 3 + 2 + 1\} \quad [10]$$

Na sequência de coeficientes temos como primeiro termo a_1 sendo 1, o último termo a_n sendo $(N-1)$ e o número de termos sendo $(N-1)$, portanto, utilizando a expressão que indica a soma dos termos S_n de uma P.A. (GIOVANNI, 2002), obtemos:

$$S_n = \frac{(a_1 + a_n).n}{2} = \frac{(1 + [N-1]).(N-1)}{2} = \frac{N^2 - N}{2} \quad [11]$$

Então, substituindo na equação [10],

$$F = mg\mu(S_n)$$

$$F = mg\mu.\left(\frac{N^2 - N}{2}\right) \quad [12]$$

Definimos N como o número total de folhas empilhadas e em nossas medidas foi utilizado como parâmetro o número de folhas N no grupo móvel. Lembrando que o número de folhas no grupo fixo é $N + 1$, temos:

$$N = 2N + 1$$

Substituindo na equação [12], obtemos.

$$F = mg\mu.(2N^2 + N) \quad [13]$$

Dessa forma encontramos uma expressão matemática para descrever nosso experimento das folhas intercaladas dispostas horizontalmente e sendo a gravidade o fator que pressiona uma folha contra a outra. A equação [13] é uma função polinomial com dependência de N , em que o termo N^2 tem maior relevância para elevado número de folhas, pois sendo $N = 100$, o termo com N^2 terá magnitude de 10000 unidades enquanto que o termo N terá 100 unidades. Podemos também fazer uma estimativa do valor do coeficiente de atrito estático máximo entre as folhas, sabendo a massa de cada folha, o número N de folhas em cada grupo e o módulo da força para separar as listas.

4 O EXPERIMENTO

4.1 A MOTIVAÇÃO

O experimento da separação de duas listas telefônicas chamou nossa atenção há bastante tempo. Em nossa busca por mais informações sobre ele, encontramos o artigo científico intitulado *Self-amplification of solid friction in interleaved assemblies* publicado na *Physical Review Letters* em Janeiro de 2016 (ALÁRCON, 2016). Após a leitura detalhada do trabalho, percebemos alguns fatores que não foram levados em consideração pelos autores, como a não realização da experiência na direção horizontal e sem o uso das braçadeiras que foram usadas nas extremidades das listas. Segundo os autores, a grande intensidade da força para separar as listas está associada ao desvio que as folhas sofrem entre as braçadeiras e a chamada zona de contato. Portanto, fizemos os seguintes questionamentos: “Realizando o mesmo experimento, mas na horizontal e sem as braçadeiras, as forças de separação seriam pequenas? Será que os autores do artigo estão corretos ao afirmar que o desvio das folhas é o único fator responsável pelas altas intensidades de força?” A partir disso, nos motivamos a elaborar um projeto de execução viável, que pudesse responder nossas dúvidas e que contribuísse com a prática no ensino da Física.

4.2 EXPECTATIVAS DA EXECUÇÃO

Para facilitar a reprodução da construção do experimento, pensamos em construir um aparato com materiais de fácil acesso, baixo custo e que suportasse grandes esforços de tração, já que prevíamos grandes intensidades de forças para puxar os grupos de folhas intercaladas, e que as folhas pudessem ser presas sem serem pressionadas umas contra as outras por outro fator além da força gravitacional.

Então, pensamos em uma estrutura horizontal presa à parede por meio de um suporte. Sobre essa estrutura seriam apoiadas as folhas intercaladas, estas seriam perfuradas em suas extremidades, e nos furos perfurados seriam

introduzidos alguns tipos de hastes que serviriam para prender as folhas à estrutura, mas sem pressioná-las.

Desejávamos algo que pudesse ser executado por um único indivíduo. Decidimos fixar uma parte do aparato à parede por um suporte e outra parte móvel ligada a essa que pudesse ser puxada, colocando um grupo de folhas sobre a parte fixa do aparato e o outro grupo de folhas na parte móvel. Mas percebemos que, colocando as folhas na horizontal entre as duas bases (fixa e móvel), surgiria uma abertura, as folhas sofreriam uma curvatura em suas extremidades voltada para baixo por conta da força da gravidade, inviabilizando o encaixe dos grupos de folhas e as medidas (Figura 4.1). Então, decidimos fazer um prolongamento da parte inferior da base fixada na parede para a deposição das folhas sobre ela e para unir essa base fixa à móvel precisaríamos de um suporte horizontal e que deslizasse.

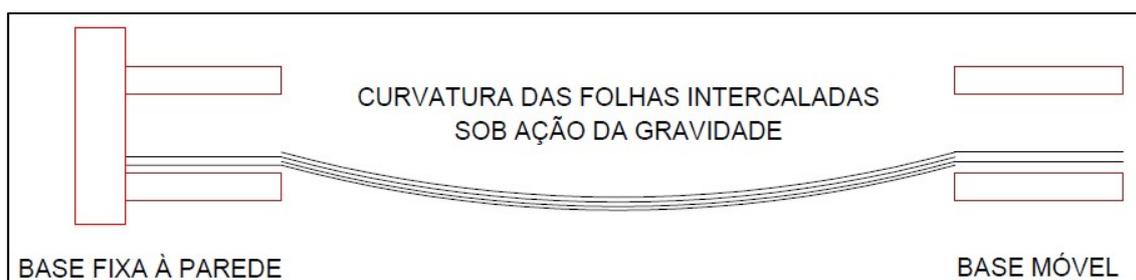


Figura 4.1. Curvatura sofrida pelas folhas intercaladas por conta da ação da gravidade.

Finalmente, para medir as forças para separação poderíamos utilizar dinamômetros. Estes ficariam entre a base móvel - onde estava um dos grupos de folhas presas - e o operador que iria puxar o aparato na tentativa de separar as folhas intercaladas.

O procedimento para a execução das medições se resumiu em:

1º passo: colocar os grupos de folhas com suas extremidades furadas em cada parte (fixa e móvel).

2º passo: intercalar todas as folhas

3º passo: um operador (pessoa) puxa a parte móvel e um dinamômetro preso a ela mede a intensidade da força necessária para iniciar o deslizamento.

Com os valores do número de folhas e da força para separação, podemos medir experimentalmente o coeficiente de atrito estático entre as folhas, utilizando para isso nossa expressão para F , apresentada neste trabalho no capítulo anterior.

4.3 CONSTRUÇÃO DO APARATO

Iniciamos desenhando um esquema em cartolina com medidas reais para verificar possíveis falhas no projeto. Após análise detalhada de nosso projeto, iniciamos a construção do aparato, onde o manual completo se encontra no *Apêndice A* deste trabalho.

Decidimos utilizar a madeira como material principal para compor o corpo do aparato, pois acreditávamos – na prática experimental a relação tentativa e erro está sempre presente - que este material tem uma resistência a tração dentro do nossa expectativa de uso. Utilizamos um painel de madeira na dimensão de 1000x200x18 mm.

Desenhamos as bases que serviriam como corpo do aparato no painel de madeira e recorreremos a um profissional de carpintaria para realizar os cortes. Em seguida, demarcamos nas bases já cortadas os pontos onde seriam realizados os furos que seriam introduzidos os parafusos de sustentação do aparato e os parafusos que iriam prender as folhas. Os furos nas folhas foram realizados utilizando a máquina de encadernação de apostilas. Para prendê-las ao aparato, pensamos inicialmente em parafusos bem finos revestidos com plástico, mas após tentar encaixar esses parafusos revestidos nos furos das folhas, percebemos que as folhas não deslizavam com facilidade por eles, devido ao atrito e ao diâmetro relativo do furo e dos parafusos. Uma das soluções seria utilizar parafusos mais finos, mas eles poderiam não suportar a força que seriam submetidos e provavelmente entortariam, comprometendo a nossa condição de ter apenas a força gravitacional interferindo nas folhas. A solução foi utilizar um perfurador de papel com maior diâmetro e que pudesse ser encaixados nesses furos parafusos com diâmetros também maiores em relação aos pensados inicialmente. Então, após as escolhas dos parafusos para cada função (sustentação das bases de madeira e para prender as folhas) e as bases de madeira cortadas, finalizamos a primeira parte de construção.

Para a fixação do aparato à parede, utilizamos um suporte de TV para parede, facilmente encontrado em lojas de materiais de construção ou de equipamentos eletrônicos. Instalamos esse suporte na parede do Laboratório de Ensino de Física do CAA. Uma chapa de aço galvanizado de 4 mm foi presa à parte fixa de madeira por parafusos e outro parafuso central maior, sendo este preso à chapa e à parede (Figura 4.1). Nosso cuidado nesse momento foi criar condições para que o aparato ficasse preso à parede e que suportasse grandes esforços no momento da execução do procedimento experimental.

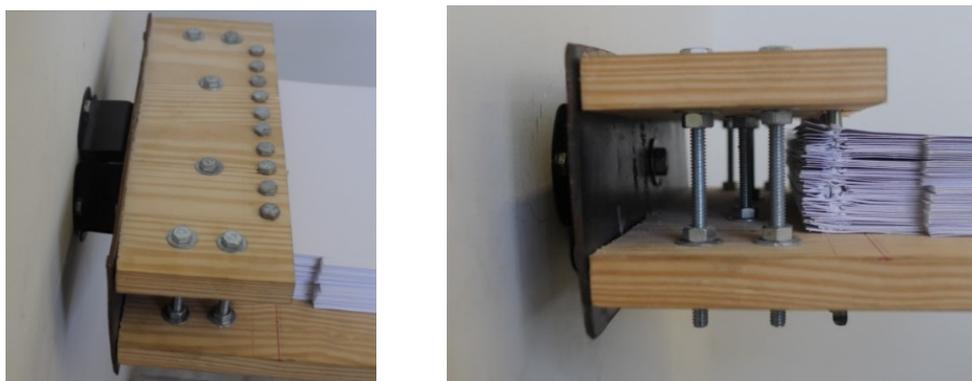


Figura 4.2. Chapa de aço galvanizado presa à parte fixa de madeira por parafusos e o parafuso central maior, sendo este preso à chapa e à parede.

Para ligar a parte fixa à móvel do aparato, usamos dois trilhos telescópicos¹ de 25 cm instalados sob elas, mantendo assim a horizontalidade e a movimentação entres essas partes (Figura 4.2).



Figura 4.3. Vista dos trilhos telescópicos instaladas sob as bases de madeira.

¹ Tentamos medir o atrito presente nos trilhos utilizando os dinamômetros, onde puxamos o aparato sem nenhuma carga, mas não obtivemos valores relevantes, logo, desconsideramos o atrito dos trilhos.

Para medir a força necessária de separação dos grupos de folhas foram utilizados cinco dinamômetros digitais, adquiridos no mercado informal no pátio da Feira de Caruaru-PE. Uma das extremidades desses dinamômetros foi colocada na parte móvel e a outra extremidade na parte que serviria como apoio para puxar o conjunto.

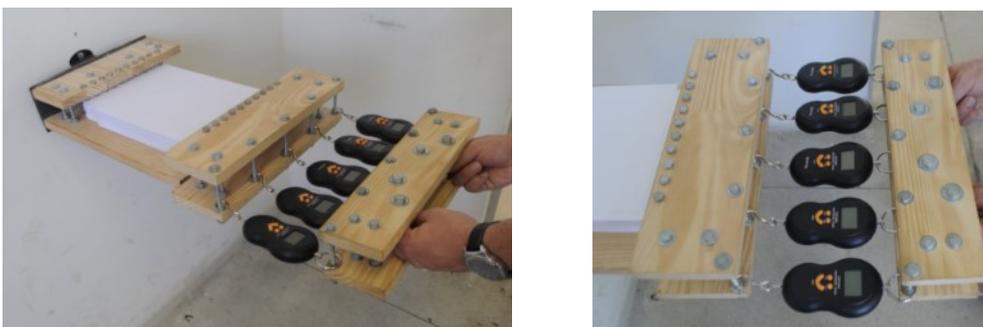


Figura 4.4. Disposição dos dinamômetros.

4.4 DIFICULDADES NAS MEDIÇÕES

As medições foram feitas na sequência de 15, 20, 25, 35, 45, 50, 55 e 65 folhas no bloco móvel, com 10 repetições em cada medida, ficando inviáveis de serem realizadas para valores maiores do que 65 folhas, pois a intensidade da força para separar os grupos atingiu um valor que duas pessoas não conseguiram mais puxar. Uma pessoa segurava com as mãos a base móvel onde eram instalados os dinamômetros e puxava até o deslizamento das folhas. A visualização da intensidade da força no visor do dinamômetro era feita por outra pessoa, enquanto outra tinha a função de tentar separar as folhas. Porém, após todas as medidas realizadas, os valores obtidos não estavam dentro de nossas expectativas teóricas. Verificamos que a divergência estava associada à imprecisão do processo de leitura das medidas mostradas no visor do dinamômetro no instante do movimento.

Como nova tentativa para obtermos uma melhor precisão do momento exato de deslize das folhas e da indicação da intensidade da força medida no visor do dinamômetro, montamos um apoio acima do aparato, e colocamos uma câmera para filmar a execução de todas as medidas. Com a filmagem das

medidas e preocupação em ver o momento certo de deslize das folhas com maior precisão, utilizamos para isso um editor de vídeos.

Utilizamos o *software* gratuito *Wondershare Filmora*. Nele analisamos os vídeos com frames de 0,1s cada. Após o levantamento dessas novas medidas, construímos uma tabela com os valores obtidos de força de separação em função do número de folhas e com um website online (XURU, 2018) encontramos a função polinomial que representava o comportamento das medidas. Mas, os resultados obtidos não foram satisfatórios e analisamos quais eram os possíveis fatores responsáveis. Verificamos que durante a execução das medidas, os furos realizados nas folhas ainda eram estreitos, pois os parafusos prendiam as folhas, gerando desvios semelhantes aos do experimento do artigo da *Physical Review Letters* (ALÁRCÓN, 2016), não atuando dessa forma apenas a força gravitacional.

Reabrimos os furos com o perfurador utilizado inicialmente. Para isso fizemos pequenos furos em torno dos que já tinham sido feitos, fazendo com que as folhas intercaladas ficassem todas na horizontal e sem desvios (Figura 4.4). Repetimos as medidas, mas obtemos novamente divergências entre o modelo experimental e teórico.

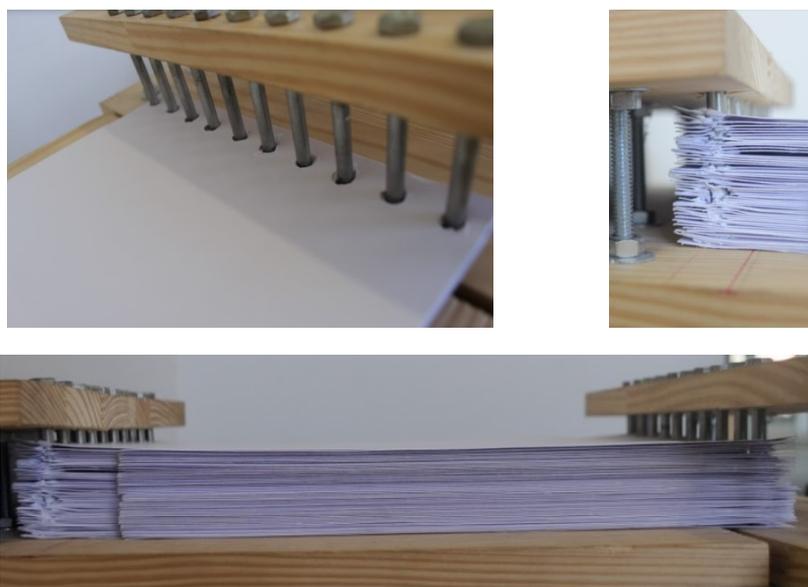


Figura 4.5. Imagens do aparato mostrando a horizontalidade das folhas intercaladas sem desvio.

Então, após três tentativas de insucesso nas medidas realizadas, demandando um tempo considerável para serem feitas, decidimos fazer um estudo detalhado dos materiais de medidas e assim fazer uma nova tentativa para evitar novos resultados indesejáveis.

4.5 NOVA ESTRATÉGIA

Fizemos uma análise criteriosa sobre quais eram os fatores que estavam interferindo nas nossas medidas. Na investigação encontramos algumas divergências e modificamos alguns elementos.

Como até então utilizamos papel do tipo sulfite A4, decidimos mudar o tipo de papel para o *vergê* A4 180g. Dispomos então de 129 folhas deste papel com as especificações mostradas na figura 4.6.



Figura 4.6. Embalagem do papel *vergê* utilizado nas nossas medidas.

Selecionamos 10 folhas ao acaso, do conjunto de 129 folhas, e medimos, para cada uma delas:

- Massa (usando uma balança digital com resolução de 0,01 g, do Laboratório de Física do CAA) (Figura 4.6);

- Largura e comprimento (usando uma régua comum, do Laboratório de Física do CAA);
- Espessura (usando um micrômetro (precisão de 0,01 mm), do Laboratório de Física do CAA) (Figura 4.7).



Figura 4.7. Balança digital.



Figura 4.8. Micrômetro.

Os resultados das medias encontradas estão na tabela 4.1.

	Massa (g)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)
Medida 1	11,50	210	297	0,28
Medida 2	11,12	210	297	0,29
Medida 3	11,37	210	297	0,29
Medida 4	11,42	210	297	0,29
Medida 5	11,20	210	297	0,29
Medida 6	11,68	210	297	0,29
Medida 7	11,22	210	297	0,30
Medida 8	11,37	210	297	0,29
Medida 9	11,24	210	297	0,30
Medida 10	11,22	210	297	0,29

Média	11,33	210	297	0,29
Desvio	0,16	0,00	0,00	0,00
Erro	0,05	0,00	0,00	0,00

Tabela 4.1: Valores experimentais de massa, largura, comprimento e espessura do papel *vergê*.

Pela especificação do fabricante, temos que a massa de uma folha deveria ser:

$$[180\text{g/m}^2] \times [0,210\text{m}] \times [0,297\text{m}] = 11,23 \text{ g.}$$

Logo, temos na média acima uma diferença percentual bastante aceitável de $(11,33 - 11,23) / 11,23 \times 100\% = 0,9\%$.

Realizamos também a análise da precisão de todos os 5 dinamômetros idênticos adquiridos para o experimento. Numeramos os dinamômetros de 1 a 5, da esquerda para a direita (considerando suas disposições no aparato experimental) (Figura 4.8).



Figura 4.9. Numeração dada aos dinamômetros para os testes de precisão.

Consta na parte traseira do dinamômetro a seguinte informação do fabricante:

0~10kg/5g

10~50kg/10g

Isso significa que na faixa de 0 a 10 kg, a precisão do instrumento é de 5 g, e que na faixa de 10 a 50 kg, é de 10 g.

Para testar a precisão dos dinamômetros utilizamos um recipiente para por grupos de N folhas. Usando a balança digital encontramos o valor de 22,23g para a massa do recipiente. Em seguida, medimos a massa do recipiente com N folhas dentro, usando de cada vez a balança digital e os 5 dinamômetros. Os resultados se encontram na tabela 4.2.

	N = 10	N = 20	N = 30	N = 40	N = 50	N = 60	N = 80	N = 100	N = 120
Balança Digital (g)	136,22	250,20	364,98	479,34	592,35	705,78	933,14	1159,70	1388,01
Dinamômetro 1 (g)	130	245	365	475	590	700	920	1145	1380
Dinamômetro 2 (g)	135	250	365	480	590	710	925	1160	1390
Dinamômetro 3 (g)	135	245	360	475	585	695	935	1155	1375
Dinamômetro 4 (g)	145	245	360	470	585	700	925	1155	1375
Dinamômetro 5 (g)	135	250	365	475	580	705	930	1160	1385
Previsão teórica*	135,53	248,83	362,13	475,43	588,73	702,03	928,63	1155,23	1381,83

Tabela 4.2: Medidas do teste de precisão dos dinamômetros utilizados em nossa prática experimental. *Considerando a massa do recipiente (medida) e a massa média de uma folha (medida).

Percebemos que os melhores dinamômetros, nessa faixa, são o 2 e o 5, pois os valores obtidos estão mais próximos dos valores medidos na balança digital, embora nenhum possa ser considerado inutilizável. A maior diferença absoluta, entre a leitura em um dinamômetro e a leitura na balança digital foi de

15 gramas, e a maior diferença relativa percentual foi de 1,6%, valor este bem aceitável.

Mas como vemos na tabela acima, o valor máximo que os dinamômetros foram exigidos de massa foi em torno dos 1400 g, o nosso experimento vai requerer esforços maiores, portanto, precisamos trabalhar com uma faixa de cargas maiores. Escolhemos fazer as medias na faixa de 2 a 20 kg de carga e fizemos uso de um garrafão de água mineral (capacidade de aproximadamente 20 litros). Para engatar o dinamômetro no recipiente colocamos um parafuso atravessando o gargalo do garrafão, usando uma furadeira para realizar os furos (Figura 4.10).



Figura 4.10. Garrafão de 20 litros com o parafuso atravessado no gargalo.

A massa desse conjunto (garrafão vazio + parafuso), medida com o dinamômetro 2 foi de 740 g.

Enchemos o garrafão com volumes de água variando de aproximadamente 2 litros a 19 litros. Para isso, usamos um recipiente de vidro do Laboratório de Física do CAA (Figura 4.10).



Figura 4.11. Recipiente de vidro utilizado para encher o garrafão de 20 litros.

Com uso da balança digital obtivemos a massa de 762,85 g para o recipiente de vidro. Identificamos, por tentativa e erro, o volume de água (água encanada do laboratório) com massa de 1 kg – para isso esperamos a balança indicar 1763 g – e em seguida assinalamos na parede externa do recipiente uma marcação fixa, usada como referência de 1 kg para as demais medições. O volume de água dentro do recipiente para a massa de 1 kg encontrado foi menor que 1 litro, significando que a densidade da água utilizada foi superior a 1 g/cm^3 .

Enchendo o garrafão com massas múltiplas de 1 kg, obtivemos as seguintes leituras no dinamômetro 2 (ver tabela 4.3).

Massa de água (kg)	Leitura no dinamômetro 2	Balança digital
1	1745 g	1763 g
2	2750 g	2763 g
3	3750 g	3763 g
4	4750 g	4763 g
5	5745 g	5763 g
6	6745 g	6763 g
7	7750 g	7763 g

8	8745 g	8763 g
9	9740 g	9763 g
10	10,73 kg	10,763 kg
11	11,73 kg	11,763 kg
12	12,74 kg	12,763 kg
13	13,73 kg	13,763 kg
14	14,71 kg	14,763 kg
15	15,71 kg	15,763 kg
16	16,70 kg	16,763 kg
17	17,68 kg	17,763 kg
18	18,70 kg	18,763 kg
19	19,71 kg	19,763 kg

Tabela 4.3. Comparativo entre as leituras no dinamômetro e balança digital para diferentes cargas.

Com os dinamômetros testados e com resultados satisfatórios, sendo eles os instrumentos de medições mais importantes do experimento, o próximo passo seria adotar uma nova estratégia sobre o agente físico que iria realizar os esforços para separação das folhas intercaladas. Inicialmente tínhamos uma pessoa segurando pelas mãos a base de madeira com os dinamômetros acoplados puxando gradativamente essa base até ocorrer o deslizamento das folhas e com o uso da filmagem e editor de vídeos encontrávamos a força medida nos dinamômetros.

Mas na nova estratégia utilizada, amarramos uma corda à base móvel onde um dos grupos de folhas estava preso e conectamos em um dos terminais do dinamômetro. No outro terminal conectamos, também por uma corda, um reservatório, no nosso caso, um garrafão de água com capacidade de 20 litros (Figura 4.12).



Figura 4.12. Esquema completo para nossa nova estratégia de medir a força para separação das folhas intercaladas.

Repetimos o processo anterior de realizar as medições para cada grupo de folhas com 15, 20, 25, 30, 35, 40 e 45 unidades. Utilizamos como carga para mover esses grupos de folhas, o garrafão com água, utilizando um recipiente para enchê-lo gradativamente até ocorrer o deslizamento das folhas. Após algumas medidas usando apenas água, conseguimos atingir até a força de 20 kgf. Para atingir cargas maiores, decidimos acrescentar areia e brita à água. Como à medida que introduzíamos grupos maiores de folhas o esforço iria ficando cada vez maior, paramos as medidas quando atingimos 45 folhas em cada grupo, por motivos de inviabilidade de esforços maiores.

Os valores do número N de folhas e a força necessária para mover esses grupos estão mostrados na tabela 4.4.

	Medida 1 (kgf)	Medida 2 (kgf)	Medida 3 (kgf)	Medida 4 (kgf)	Medida 5 (kgf)	Média (kgf)	Desvio	Erro
N = 15	3,1	3,1	3,1	2,8	2,9	3,00	0,13	0,06
N = 20	5,6	5,6	5,3	5,3	5,3	5,42	0,15	0,07
N = 25	8,8	8,9	8,6	8,5	9,3	8,82	0,28	0,12
N = 30	14,2	13,7	14,5	12,8	12,1	13,46	0,89	0,39
N = 35	18,4	17,8	19,6	18,4	18,9	18,62	0,60	0,27
N = 40	24,0	21,0	22,8	22,4	24,1	22,86	1,14	0,51
N = 45	32,3	33,6	30,6	37,2	32,7	33,28	2,19	0,98

Tabela 4.4. Valores experimentais de força para separar folhas intercaladas na horizontal (Folhas dispostas horizontalmente)

A partir dos dados obtidos e mostrados na tabela 4.4., podemos observar através da Fig. 4.1 o comportamento da força F de separação das listas com as folhas intercaladas em função do número N de folhas. Percebemos um aumento rápido na intensidade de F à medida que aumentamos o valor de N , sendo então os valores experimentais coerentes com a expressão teórica obtida.

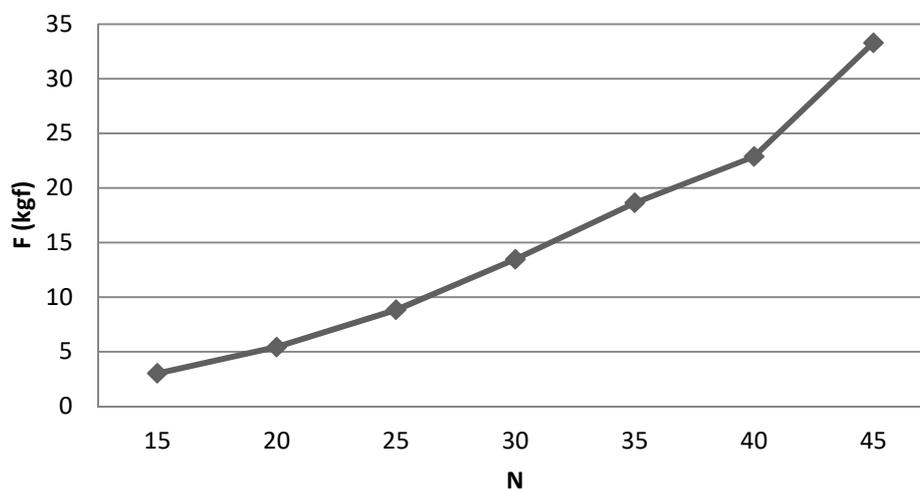


Gráfico 4.1. Força de separação F das listas com as folhas intercaladas em função do número de folhas N para o aparato disposto horizontalmente.

Em outro momento, decidimos repetir os procedimentos, mas com o aparato rotacionado de um ângulo de 90° , o objetivo nesse momento foi verificar os valores da força de separação sem a força gravitacional como o agente que pressiona as folhas (Figura 4.12). Os valores obtidos estão presentes na tabela 4.5.

	Medida 1 (kgf)	Medida 2 (kgf)	Medida 3 (kgf)	Medida 4 (kgf)	Medida 5 (kgf)	Média (kgf)	Desvio	Erro
N = 15	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,48	0,04	0,02
N = 20	0,7	0,9	1,0	0,9	0,8	0,86	0,08	0,03
N = 25	1,2	1,1	1,1	1,6	1,4	1,28	0,19	0,08
N = 30	1,5	1,5	1,5	1,6	1,5	1,52	0,04	0,02
N = 35	1,8	1,7	1,6	1,6	2,0	1,74	0,15	0,07
N = 40	1,4	1,9	2,0	1,9	1,9	1,82	0,21	0,09

N = 45	2,1	2,3	2,7	2,1	2,5	2,34	0,23	0,10
---------------	-----	-----	-----	-----	-----	-------------	------	------

Tabela 4.5. Valores experimentais de força para separar folhas intercaladas na vertical (folhas dispostas sob ângulo de 90° em relação à condição inicial)

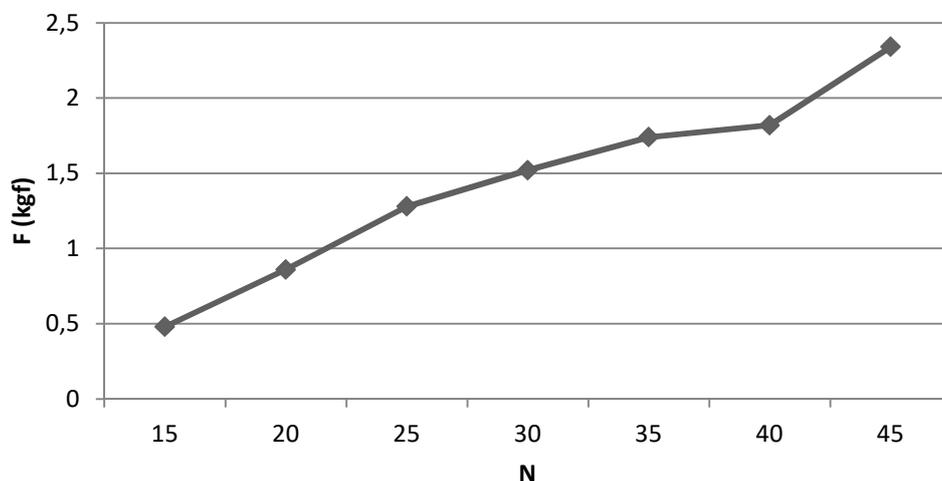


Gráfico 4.2. Gráfico de força de separação F das listas com as folhas intercaladas em função do número de folhas N para o aparato rotacionado de 90° .



Figura 4.13. Aparato rotacionado de 90° .

Percebemos na tabela 4.5 e no gráfico 4.2, intensidades muito baixas das forças de separação, podemos associar esse residual às chamadas forças de adesão. São forças de atração entre dois sólidos, com superfícies de contato comuns, de natureza eletrostática (ELEY, 1961) entre as folhas nessa configuração.

4.6 COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO EXPERIMENTAL

Para medir o coeficiente de atrito estático entre as folhas de papel *vergê*, utilizamos dois métodos diferentes: o primeiro foi utilizando nosso aparato experimental e o outro foi com uso de um plano inclinado.

4.6.1 Método de obtenção do coeficiente de atrito estático utilizando o aparato experimental

Ainda com as folhas presas em cada base do aparato (Fixa e móvel), separamos os grupos de folhas para que elas não ficassem intercaladas. Apoiamos o grupo de folhas da base móvel sobre o grupo de folhas da base fixa. Sobre o grupo de folhas da base móvel apoiamos um objeto com massa conhecida (medida no dinamômetro 2). Medimos com o dinamômetro preso à base móvel a força necessária de separação, sendo esta então, aproximadamente a força de atrito estático máxima entre as superfícies. Repetimos 5 vezes as medidas para cargas de 1 kg, 2 kg 4 kg e 6 kg, obtendo os valores apresentados na tabela 4.6.





Figura 4.14. Esquema para obtenção do coeficiente de atrito estático experimental.

Carga (kg)	Medida 1 (kgf)	Medida 2 (kgf)	Medida 3 (kgf)	Medida 4 (kgf)	Medida 5 (kgf)	Média (kgf)	Desvio	Erro
1	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,36	0,05	0,02
2	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,62	0,04	0,02
4	1,2	1,3	1,3	1,3	1,1	1,20	0,09	0,04
6	1,7	1,6	1,7	1,5	1,5	1,60	0,09	0,04

Tabela 4.6. Valores da força necessária para mover o grupo de folhas sob ação de cargas.

Os valores das forças mostradas na tabela são equivalentes às forças de atrito estático máximas, segundo as Leis de Amontons e Coulomb para o atrito, que constituem nossa referência teórica para o desenvolvimento matemático apresentado neste trabalho. A 1ª lei do atrito determina que:

$$\mu = \frac{F_{\text{atrito estático máxima}}}{F_{\text{normal}}} \quad [12]$$

Logo, podemos encontrar o coeficiente de atrito estático médio para cada valor de carga utilizada (ver tabela 4.7).

Carga (kg)	Força média (kgf)	$\mu_{\text{méd}}\text{io}$
1	0,36	0,36
2	0,62	0,31
4	1,20	0,30
6	1,60	0,27

Tabela 4.7. Valores dos coeficientes de atrito estático médio no primeiro método

A necessidade de colocar uma carga sobre o grupo de folhas deve-se ao fato de que sem essa carga, a força medida no dinamômetro é muito pequena, na ordem de 0,1 kgf, inviabilizando assim qualquer tentativa de precisão nas medidas de interesse.

4.6.2 Método de obtenção do coeficiente de atrito estático utilizando um plano inclinado

Para confirmar os valores encontrados com o método anterior, construímos um plano inclinado. O manual de construção do plano inclinado utilizado se encontra no Apêndice B. Usamos a madeira como material para as bases, uma dobradiça para auxiliar na rotação do plano, uma presilha fixada na parte superior do plano inclinado e um transferidor preso à base horizontal para medir o ângulo de inclinação (ver figura 4.15).

Para medir o coeficiente de atrito entre papel com papel, cobrimos a superfície do plano com uma folha que foi presa à presilha. Utilizamos como objetos a serem deslizados sobre o plano: uma folha de papel (massa de 11,23 g) e dois conjuntos de placas de acrílico com a superfície inferior revestida com papel (cada conjunto com 175 g e 1000 g). Para cada objeto, rotacionamos o plano inclinado e medimos o ângulo de inclinação no momento da iminência do movimento, repetindo esse processo 5 vezes.

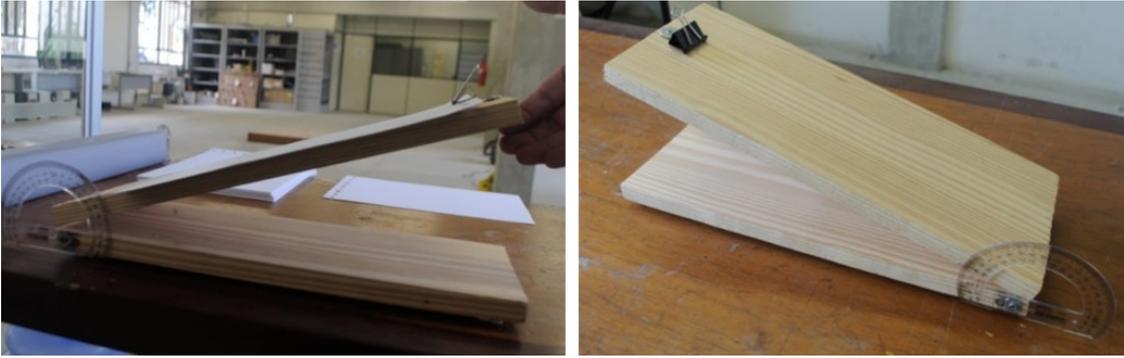


Figura 4.15. Plano inclinado construído para obtenção do coeficiente de atrito entre folhas de papel vergê.

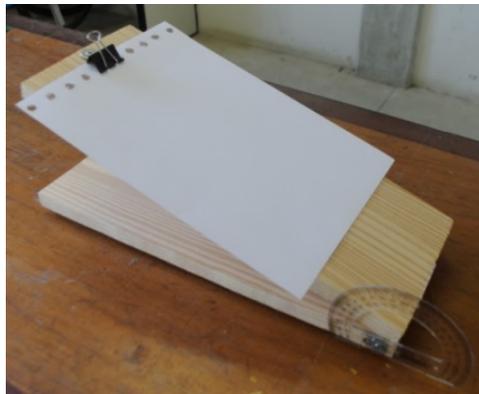


Figura 4.16. Papel vergê preso pela presilha sobre o plano inclinado.

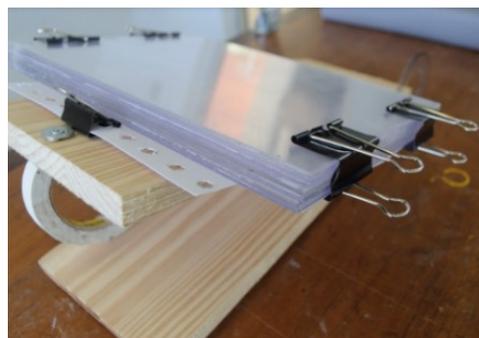


Figura 4.17. Bloco de massa 1000 g composto por placas de acrílico. Abaixo das placas foi presa uma folha de papel vergê para manter a interação papel-papel.

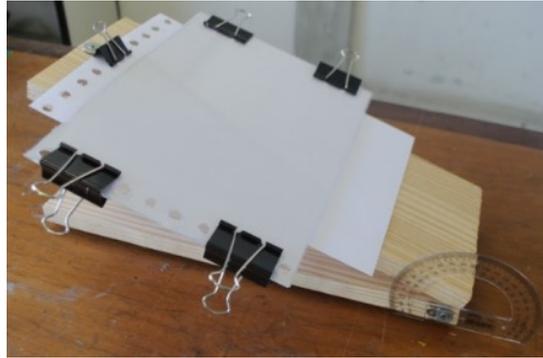


Figura 4.18. Bloco de massa 175 g composto por placas de acrílico. Abaixo das placas foi presa uma folha de papel *vergê* para manter a interação papel-papel.



Figura 4.19. Transferidor instalado na base inferior do plano inclinado.



Figura 4.20. Detalhes da presilha instalada no topo do plano inclinado.

Vamos supor uma carga de massa m apoiada sobre um plano inclinado com coeficiente de atrito estático μ e inclinação θ em relação à horizontal. Estando a carga na iminência do deslizamento e adotando o referencial cartesiano dado na figura 4.21, temos:

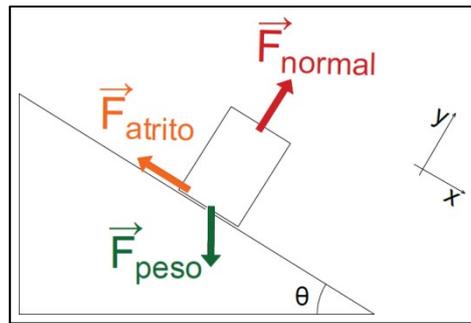


Figura 4.21. Esquema de um plano inclinado.

$$F_{\text{peso, componente } x} = F_{\text{atrito estático máximo}}$$

$$m \cdot g \cdot \text{sen}\theta = \mu \cdot m \cdot g \cdot \text{cos}\theta$$

$$\mu = \text{tg}\theta \quad [13]$$

A equação indica que o coeficiente de atrito estático entre duas superfícies num plano inclinado é igual a tangente do ângulo de inclinação no momento da iminência do movimento. Mas quando estamos tratando de coeficiente de atrito devemos nos atentar para a dependência dele em relação a outros parâmetros, como umidade relativa do ambiente e temperatura (CRASSOUS, 1999). Para a interação papel com papel (CETR, 2018), μ depende da carga normal: ele aumenta com a diminuição da carga e pode assumir valores maiores que 1 para cargas pequenas, devido às forças de adesão (CRASSOUS, 1999). Isso está de acordo com os dados obtidos experimentalmente com o uso do plano inclinado (ver tabela 4.8).

	Folha livre	175 g	1000 g
Θ_1	36°	25°	21°
μ_1	0,72	0,47	0,38
Θ_2	42°	26°	19°
μ_2	0,90	0,49	0,34
Θ_3	34°	21°	18°
μ_3	0,67	0,38	0,32
Θ_4	32°	24°	20°
μ_4	0,62	0,44	0,36
Θ_5	34°	26°	19°
μ_5	0,67	0,49	0,34
$\mu_{\text{MÉDIO}}$	0,72	0,45	0,35
μ_{DESVIO}	0,09	0,04	0,02
μ_{ERRO}	0,04	0,02	0,01

Tabela 4.8. Valores medidos do ângulo de inclinação do plano inclinado no momento do deslizamento para uma folha livre, para uma carga de 175 g e outra de 1000 g, e dos coeficientes de atrito experimentais para cada inclinação θ .

Perceba que os valores mostrados nas tabelas 4.7 e 4.8 possuem uma boa coerência, pois com ambos os métodos obtivemos, para carga de 1 kg, valores bem próximos para o coeficiente de atrito estático.

5 ELABORAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

O nosso trabalho surgiu de uma curiosidade sobre o famoso experimento da suposta inseparabilidade de duas listas telefônicas com suas folhas intercaladas. Vimos que, mesmo sem o uso de braçadeiras, a força necessária para separar dois conjuntos de folhas intercaladas cresce rapidamente com o número de folhas em cada conjunto (veja a eq.[11] do capítulo 3 e a tabela 4.4), e que a gravidade, por mais que seja uma força de pequena intensidade em comparação às outras existentes no universo, causa um grande efeito sobre sistemas macromecânicos.

Para defender nossos argumentos acerca deste fenômeno, elaboramos e construímos um aparato experimental com materiais de fácil acesso, mas que requer um tempo razoável para um professor reproduzi-lo. Inicialmente, o nosso produto educacional seria o manual de construção deste aparato, mas durante a execução percebemos várias dificuldades. Acreditamos que uma das características de um produto educacional é a sua utilização nas mais variadas condições em ambientes escolares. Então, decidimos utilizar uma ferramenta com custo quase zero para aqueles que a queiram usar, e com abrangência significativa em sua disseminação, com objetivo de facilitar o uso e acesso ao nosso experimento e estudo. Portanto, uma das melhores estratégias dentro dessas perspectivas é a utilização de uma produção audiovisual e que esteja disponível em redes de comunicação, como a internet. Pois dificilmente teremos alguma escola que não tenha uma televisão, um computador ou internet para ter acesso ao nosso trabalho audiovisual. O professor que queira construir nosso aparato terá acesso ao nosso manual de construção do aparato experimental.

Atualmente, o uso da internet nas práticas de ensino está sendo cada vez mais comum, seja para apresentar um documentário, um experimento, um artigo, uma vídeo-aula ou utilizar alguma informação pública para debates. Em relação aos vídeos de apresentação de estudos, existem os mais variados formatos e técnicas de elaboração e construção. Nós utilizamos então a técnica do *Chroma Key* para a produção do vídeo. A técnica consiste em dispor um

apresentador em frente a um painel de cor verde ou azul, e com uso de um software editor de vídeos apropriado, introduzir nesse fundo colorido qualquer efeito visual, dando assim muitas possibilidades de uso. Para isso, fizemos parceria com as empresas *BAK COMUNICAR*² e *ITAPUÃ VÍDEO E COMUNICAÇÃO*³ para a gravação e edição do vídeo.

Elaboramos um roteiro com um breve resumo da nossa motivação para realizar o trabalho, o objetivo do trabalho experimental, os resultados obtidos e aplicações em outras áreas da ciência. O vídeo tem duração aproximada de 10 minutos e será disponibilizado no site de compartilhamentos de vídeos *YouTube* com acesso gratuito.



Figura 5.1. Instantâneos da filmagem do nosso vídeo.

Link para acesso: <https://www.youtube.com/watch?v=LzxIITQUB-o>

² Empresa com sede na cidade de Vitória de Santo Antão/PE. Seus trabalhos estão voltados à produção de áudios e vídeos empresariais, governamentais, políticos e pessoais, seja para televisão, rádio ou web.

³ Empresa responsável pelas edições do vídeo e áudios da filmagem.

6 RELATO DA EXPERIÊNCIA DE APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

Nosso trabalho aborda o estudo da força de atrito entre superfícies sólidas, portanto o público alvo do nosso trabalho são alunos que já tenham conhecimentos prévios sobre forças de atrito (segundo as definições de Amontons e Coulomb) e seus efeitos, tendo melhores condições em anexar os conhecimentos que já possuem com os que terão acesso através deste trabalho.

Segundo as orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais (PCN+), são apresentados 6 temas estruturadores – Movimentos: variações e conservações; Calor, ambiente, fontes e usos de energia; equipamentos eletromagnético e telecomunicações; som, imagem e informação; matéria e radiação; Universo, Terra e vida – com proposta de desdobramentos de cada um dos temas a fim de concretizar a associação entre competências e habilidades visando os objetivos de formação desejados (BRASIL, 2006). Nesse documento os conteúdos sobre movimento estão presentes na 1ª série do Ensino Médio – embora que das 3 sequências apresentadas, uma delas insere esse tema na 2ª série do Ensino Médio como possível proposta de organização. Os alunos que participaram da atividade de aplicação do produto educacional pertencem à 2ª série do Ensino Médio.

O trabalho foi aplicado no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas, no campus da cidade de Santana do Ipanema/AL, localizado na região do sertão alagoano a 210 km da capital. O campus possui os cursos técnicos integrados em administração e agropecuária e o curso técnico subsequente em agropecuária. A turma escolhida para realização da atividade foi da 2ª série A do curso técnico integrado em agropecuária, que consta de 30 alunos matriculados.

Para a execução da aula utilizamos um retroprojetor com saída de áudio, um computador conectado à internet e um smartphone com aplicativo para gravação de áudio para posterior análise do que foi discutido durante a aula.

Nossa atividade tem como princípio a participação ativa do aluno na construção da sequência de ideias. O professor nesse processo é um orientador, mediador, um guia, na tentativa de ancorar (MOREIRA, 2006) o que está sendo conhecido pela primeira vez com o que já foi vivenciado por eles. Começamos abordando alguns pontos da área central de estudos no ano anterior - o estudo do movimento dos corpos - como os conceitos de deslocamento, tempo, velocidade e aceleração.

Em seguida, falamos sobre as causas que geram e modificam o movimento dos corpos, questionando, por exemplo, o que é preciso para fazer o apagador do quadro que estava em repouso sobre a mesa adquirir movimento ou um objeto se movendo, inicialmente, em linha reta realizar posteriormente uma trajetória curvilínea. Para todos os exemplos dados, a resposta foi: “a ação de uma *força*”. Perguntamos logo em seguida se essa força deve ser aplicada em qualquer direção e sentido para fazer a modificação que deseja, afirmando eles, que existe de fato a dependência no efeito do movimento com o local onde a força é aplicada. A partir dessas ideias iniciais sobre força, conseguimos facilmente chegar à conclusão de que uma força que se opõe ao movimento de um corpo tende a atrapalhar esse movimento e podendo até fazê-lo parar. Até esse momento a participação e interação dos alunos são quase que total, confirmando certa solidez no que foi construído no ano anterior sobre esses pontos.

Nosso outro momento foi relembrar um dos tipos de força estudado por eles, a força de atrito, já que ela é o nosso objeto de estudo. Para isso, partimos do último ponto comentado por eles no primeiro momento: “uma força que se opõe ao movimento de um corpo tende a atrapalhar esse movimento e podendo até fazê-lo parar”. Perguntamos então quais forças eles podiam citar que realizavam esse papel de se opor ao movimento, e todos citaram primeiramente a força de atrito. Chamamos atenção que não necessariamente seja sempre o atrito esse agente opositor do movimento, podendo ser qualquer outra força, como uma pessoa segurando algo para não deslizar por uma rampa inclinada ou a força do empuxo que faz os objetos flutuar em água. Voltamos então para a discussão sobre a força de atrito, perguntando quais os fatores que influenciam a intensidade dela. A maioria dos alunos responderam

utilizando o termo “a superfície”. Acreditamos que estavam fazendo alusão ao coeficiente de atrito entre as superfícies. Então reiteramos a resposta dada por eles dizendo que existe um fator adimensional que “mede” essa dependência com a superfície, chamado de coeficiente de atrito.

Fizemos a seguinte demonstração: o professor pegou uma cadeira vazia da sala e arrastou até certo ponto, e em seguida pediu para um dos alunos sentarem na cadeira e repetiu o movimento, mas agora com mais dificuldades. Voltamos aos alunos e chamamos atenção de que nos dois momentos, as superfícies envolvidas são as mesmas; logo, o coeficiente de atrito é o mesmo em ambos. Perguntamos o motivo pelo qual com a cadeira ocupada o movimento se tornou mais difícil de acontecer, tendo como resposta da maioria da turma a atuação da força peso, embora outros tenham dito, corretamente, ser a força normal. Falamos que em certa parte eles estavam corretos, mas as definições na física devem ser as mais gerais possíveis. Como queremos atingir todos os alunos na construção das ideias, partimos para outra estratégia: voltamos a pegar o apagador e pressionamo-lo dessa vez contra a parede com força necessária para mantê-lo em repouso sobre ela, e aos poucos, diminuimos a força que o segurava até o momento da queda. Perguntamos quais forças estavam atuando sobre o apagador no momento enquanto estava em repouso e o que diferenciava a nossa ação antes e depois da queda. Segundo os alunos, a força que o professor estava aplicando ficou menor, diminuindo a força normal e o atrito. Assim conseguimos construir a interpretação da situação, em que o atrito não depende da força peso dos objetos, e sim da força normal entre as superfícies envolvidas, pois em ambos os exemplos, a força normal está diretamente relacionada com os efeitos do atrito, enquanto que o peso interferiu de maneira direta apenas na primeira situação. A partir disso, definimos matematicamente a força de atrito como sendo proporcional à força normal entre superfícies, e a constante de proporcionalidade sendo o coeficiente de atrito, finalizando assim o nosso segundo e último momento de resgate de conhecimentos sobre atrito, sendo então possível iniciar a reprodução do vídeo.

Iniciamos a apresentação do vídeo. Já nos primeiros minutos dele é sugerido o acesso a links de vídeos que demonstram o experimento da

tentativa de separar duas listas telefônicas. Fizemos uma pausa para acessar essas sugestões. A aceitação dos alunos nesse momento foi muito boa, pois o acesso a esse tipo de divulgação de informação é muito utilizado por este público, e também pelo fato dos vídeos escolhidos serem produzidos por canais de divulgação científica já conhecidos por eles. Utilizamos três links para a demonstração das sugestões e logo em seguida continuamos assistindo ao vídeo, agora sem interrupções.

Após assistirmos o vídeo, iniciamos uma discussão a partir do que eles observaram. Nessa conversa a participação dos alunos foi um pouco reduzida. Acreditamos que isso se deva a alguns fatores como a timidez no falar em público, a baixa experiência na construção de argumentos e ideias em sequência lógica, o não entendimento do que foi repassado no vídeo que poderia ser resolvido se o mesmo fosse assistido mais uma vez⁴, além de outros fatores, já que no processo de ensino-aprendizagem a vivência que o aluno possui enquanto indivíduo social é um fator que influencia no seu desenvolvimento cognitivo.

Primeiramente pedimos para descreverem o aparato utilizado pelos autores do artigo da PRL. Alguns responderam dizendo ser igual ao experimento realizado pelo programa de *TV MythBusters* – um dos vídeos de sugestão proposto no nosso vídeo - com as folhas presas, mas na vertical. Então perguntamos: Estando as folhas na vertical, qual o fator que pressiona uma folha na outra? Alguns poucos responderam dizendo ser as braçadeiras, mas para melhorar o entendimento dos demais, pegamos duas folhas que estavam soltas na banca de um dos alunos e encostamos uma na outra pela vertical simulando a disposição das folhas no aparato e com as mãos pressionamos as extremidades como as braçadeiras. Essa ação já foi o suficiente para os demais entenderem o que estávamos tentando elucidar. Em seguida, dei uma pausa no vídeo que eles mencionaram como parâmetro de comparação, mostrando a imagem dos livros intercalados e pedimos para observarem com cuidado, descrevendo o que estavam vendo. Alguns disseram que as folhas faziam um desvio muito grande, gerando deformações nelas. Então perguntamos o nome do parâmetro adimensional dado pelos estudiosos,

⁴ Essa possibilidade é uma das qualidades no uso das estratégias audiovisuais no ensino.

e grande maioria respondeu como sendo o “Hércules” em referência ao parâmetro encontrado pelos autores do estudo da *PRL*. Portanto, segundo os alunos a gravidade não é a responsável por pressionar uma folha contra a outra, e percebendo a influência desse desvio nas folhas por conta das braçadeiras, chegaram à conclusão de que a grande dificuldade em separar as listas deve-se a esse desvio.

Perguntamos a diferença entre o experimento construído pelos autores do artigo científico e o nosso aparato, e um deles em especial foi mais seguro na resposta: “Porque no *MythBusters* eles utilizaram livros onde naquela parte central fica mais concentradas as folhas e as outras, digamos, ficaram mais dispersas daquele ponto central do livro e o seu trabalho são de folhas normais, não são de nenhum caderno, as folhas estão soltas, sem serem presas”. Perguntamos se os demais tinham algo a acrescentar na fala do colega e todos foram de acordo com a opinião dele. Percebemos nesse momento uma boa explicação do comparativo entre os fenômenos mostrados, com um pouco de limitações nas palavras utilizadas, mas que ao final a ideia geral foi repassada de maneira muito satisfatória. É importante durante a construção dos conhecimentos reconhecer e elogiar as opiniões dos alunos e quando uma ideia não está de acordo com o contexto, tentar fazer com que o próprio aluno perceba a sua falha e ele mesmo consiga encontrar a solução, embora que isso nem sempre é alcançado. Quando isso ocorrer, o professor deve atuar expondo então as soluções do problema.

Perguntamos então sobre a motivação que nos fez elaborar o experimento, e a maioria confirmou dizendo fazer algo parecido, mas sem o desvio, ou seja, sem as braçadeiras e na horizontal. E antes de fazer a pergunta, alguns já completaram dizendo que nesse modelo proposto por nós a gravidade irá pressionar uma folha contra a outra. Começamos a ver uma evolução na nossa discussão. Grande parte dos alunos montou a sequência de ideias a partir do que está sendo abordado naquele momento, ou seja, eles fizeram a relação da causa e consequência que determinado fator pode gerar. Voltei a parabenizá-los pelo entendimento do fenômeno até aquele momento, com o intuito de encorajá-los a continuar no ritmo de participação.

Continuando na nossa discussão, perguntamos se ao longo da distribuição de folhas empilhadas e intercaladas as forças normais entre as folhas têm a mesma intensidade, e a maioria respondeu dizendo que as folhas de baixo são mais pressionadas do que as de cima. Aproveitando essa conclusão deles, perguntamos se a força de atrito entre as folhas tem as mesmas intensidades para todas elas e recebemos como resposta que não. Acrescentaram ainda que as folhas de baixo têm “mais atrito” do que as da parte superior. Indagamos se a intensidade da força para separar as folhas intercaladas no nosso aparato tornou-se pequena ou ainda foi alta mesmo sem as braçadeiras e responderam dizendo que ainda é muito alta, mas acreditam que a presença das braçadeiras aumenta a dificuldade.

Ainda sobre o nosso experimento, perguntamos se eles conseguiram entender o modelo do aparato a partir das fotos mostradas no nosso vídeo e todos afirmaram que sim. Então, sabendo dessa condição, lançamos uma situação-problema que requer um pouco de abstração cognitiva: “utilizando nosso aparato experimental, como podemos medir o coeficiente de atrito entre as folhas?”. Para orientá-los sobre a solução desse problema, mostramos a definição matemática da força de atrito e perguntamos quais elementos dessa definição é preciso saber para calcular o coeficiente de atrito, então eles respondem dizendo ser a força normal entre as superfícies e a força de atrito. Questionamos quais seriam os métodos para medição desses dois elementos. Aquele momento, grande parte dos alunos apresentou certa dificuldade em opinar, mas alguns respondem rapidamente que a força normal pode ser medida através do peso das folhas usando a balança (o dinamômetro mostrado no nosso vídeo sobre o nosso aparato). Mas infelizmente, para o problema de como medir a força de atrito não houve nível de participação suficiente. Sugerimos então que esse ponto da discussão seja pensado por eles e que na próxima aula da semana seguinte retornaríamos para esse problema, pois a investigação do fenômeno é um dos pontos mais importantes na consolidação da aprendizagem.

Para finalizar a abordagem acerca do problema experimental, expusemos um problema que tivesse a possibilidade de os alunos se aproximarem da expressão matemática que obtivemos para a força de

separação das folhas intercaladas. Fomos ao quadro e desenhamos um modelo (ver figura 6.1) que se aproxima da forma como as folhas foram dispostas no experimento e deduzimos a relação matemática para a situação mostrada. O interessante é que naquele momento as dificuldades encontradas por eles foram muito pequenas, já que possuíam experiências anteriores sobre resolução de problemas que envolvesse o atrito. Propusemos então um desenvolvimento semelhante, mas com quatro folhas presas e três móveis, porém para ser apresentada na aula seguinte.

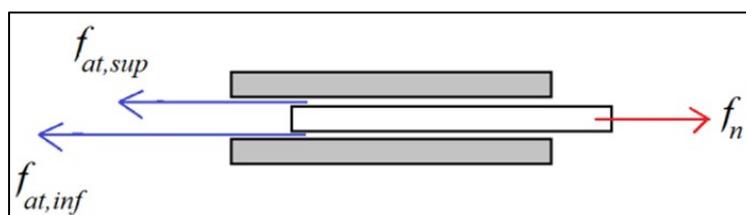


Figura 6.1. Esboço do esquema que utilizamos durante a aula pra iniciar nossa discussão teóricas das folhas intercaladas.

Com a expressão geral mostrada no vídeo, perguntamos qual elemento dela é responsável pelo rápido aumento da força para tentar separar as folhas intercaladas. Para isso, chamamos a atenção de que os fatores massa, aceleração gravitacional e coeficiente de atrito são os mesmos para qualquer número de folhas. Então, os alunos facilmente chegaram à conclusão de que a dependência da força F é maior para o termo N^2 presente na expressão. Para confirmar essa conclusão, perguntamos se ao dobrar o número de folhas, a força F também dobraria, e alguns alunos afirmaram que sim, e outros não. Para melhorar o entendimento dessa relação entre F e N , usamos valores de $N = 2$ e $N = 3$ e calculamos o valor de F para cada N . Após isso, os demais confirmaram que o valor de F não depende de maneira linear e proporcional ao valor de N .

E para finalizar a aula, enfatizamos a importância de realizar estudos e pesquisas sobre atrito e pedimos para eles citarem algumas situações do cotidiano, em qualquer área, que houvesse o atrito como agente influenciador e que merecesse atenção por seus efeitos. Os exemplos dados por eles foram: a tecnologia dos pneus de carros a fim de evitar acidentes, solados de calçados,

o desenvolvimento de veículos de locomoção mais rápidos e o desgaste de peças em máquinas.

Por fim, agradecemos a participação de todos os alunos na aula, elogiando as boas colocações dadas por eles e incentivando a busca cada vez mais de conhecimentos através da ferramenta poderosa que eles têm acesso que é a internet.



Figura 6.2. Fotos do momento da aplicação do produto educacional.

7 CONCLUSÕES

Nosso trabalho surgiu primeiramente da vontade de entender com mais detalhes o fenômeno da quase inseparabilidade de duas listas telefônicas, através do estudo de um artigo científico elaborado pelos autores Héctor Alárcon, Thomas Salez, Christophe Poulard, Jean-Francis Bloch, Élie Raphaël, Kari Dalnoki-Veress e Frédéric Restagno publicado na *Physical Review Letters*. Buscamos abordar o mesmo fenômeno, mas com aspectos diferentes, tentando fazer uma crítica à não observância dos autores do artigo para alguns pontos. A partir dessa proposta inicial, constatamos outra utilidade de nossa investigação experimental: de gerar com essa análise uma ferramenta que auxiliasse no ensino da Física, em especial quanto ao atrito. Ou seja, a partir de um estudo científico, conseguimos extrair estratégias que contribuísse para o aprendizado em Física, inclusive a nível médio.

Para isso, elaboramos um manual de construção do nosso aparato experimental que está presente no *Apêndice A* deste trabalho. Com ele o professor pode trabalhar com seus alunos não apenas o fenômeno do atrito, mas outra atividade que vise, por exemplo, estudar os esforços de tração em determinados sistemas mecânicos, por exemplo, forças para deformações em molas. Poderá também modificar alguns elementos do aparato para tentar encontrar novos procedimentos experimentais. Sendo nosso aparato de fácil construção e execução, porém com requisição de tempo para essas ações.

Mas a contribuição mais importante, em nossa opinião, foi a produção do projeto audiovisual que culminou em produto educacional. Esse tipo de trabalho possui amplo uso nas salas de aula e o professor terá várias possibilidades de uso, seja em aulas presenciais ou à distância, podendo ser visto e revisto quantas vezes for necessário de acesso fácil e gratuito. Resumindo, implementamos dois trabalhos diferentes com o mesmo fenômeno, aumentando ainda mais as possibilidades de uso de ambos na prática escolar.

Em relação à nossa experiência em sala de aula com a utilização do nosso vídeo, pudemos perceber evidências de aprendizagem significativa, ou

seja, a nossa ferramenta interagiu em alguns aspectos com os conhecimentos prévios dos alunos sobre atrito, proporcionando o surgimento de novos conhecimentos na bagagem cognitiva deles. Mas como o público escolhido para a aplicação do produto educacional possui um histórico educacional precário e a maioria tem origem de famílias de baixa renda, o fato de conseguirem construir previsões acerca das etapas da nossa conversa já é um bom parâmetro de que houve desenvolvimento cognitivo, pois acompanhamos esses jovens há mais de um ano – trabalhamos juntos no ano letivo passado - e percebemos claramente uma mudança significativa na participação deles em sala de aula.

Mas sabemos que um vídeo de duração de 10 minutos aplicado e discutido durante uma hora e vinte minutos de aula não pode ser considerado como um ótimo ou único parâmetro para afirmar categoricamente que ocorreu de fato a aprendizagem de todos os alunos atingidos. A aprendizagem é algo que precisa de continuidade e tempo para termos resultados satisfatórios, embora que, a partir do que os alunos externaram sobre suas interpretações e entendimento do que estava sendo proposto durante a aula, pudemos chegar ao consenso de que realmente houve certo aprendizado, aprendizado este que aula após aula será cada vez mais consolidado.

Então, nosso trabalho é uma estratégia a ser utilizada em um dado momento dessa sequência longa de sucessivos aprendizados, sendo mais adequado para determinada condição e em outras não. Cabe ao professor, em conjunto com a escola, planejar juntos as melhores táticas a serem utilizadas para contribuir com a construção do conhecimento dos alunos.

REFERÊNCIAS

[CETR, 2018] <http://www.cetr.com/eng/services/paper.html>. Acesso em junho de 2018.

[DAVIDWILLEY-YOUTUBE, 2018] “David Willey - **Tearing two interlaced phone books apart using two 18 wheeler trucks**”: <https://youtu.be/qjKpQxllUw>. Acesso em junho de 2018.

[DISCOVERY-YOUTUBE, 2018] “Discovery - MythBusters - **Phone Book Friction**”: https://youtu.be/AX_ICOjLCTo. Acesso em junho de 2018.

[IMPROBABLE, 2018] “**New Mathematical Model Helps Explain the Strength of Interleaved Phonebooks**”: <https://www.improbable.com/2016/01/09/new-mathematical-model-helps-explain-the-strength-of-interleaved-phonebooks/>. Acesso em junho de 2018.

[MANUAL1-YOUTUBE, 2018] “Manual do Mundo - **Livros que grudam sem cola**”: <https://youtu.be/bCTL0PQPOj0>. Acesso em junho de 2018.

[MANUAL2-YOUTUBE, 2018] “Manual do Mundo - **Será que a lista aguenta dois carros?**”: <https://youtu.be/oMUDUmJ-d5s>. Acesso em junho de 2018.

[MYTHBUSTERS-YOUTUBE, 2018] “MythBusters no IMDb (**“Phone Book Friction”**)”: <https://www.imdb.com/title/tt1266951>. Acesso em junho de 2018.

[XURU, 2018] <http://www.xuru.org/rt/PR.asp>. Acesso em março de 2018.

ALÁRCÓN H., T. Salez, C. Poulard, J.-F. Bloch, E. Raphael, K. Dalnoki-Veress e F. Restagno. **Self-Amplification of Solid Friction in Interleaved Assemblies**. Physical Review Letters 116, 015502 (2016).

ALMEIDA, Maria Elizabeth Bianconcini. **Tecnologia na escola: criação de redes de conhecimentos**. Brasília, 2005. Programa Salto para o Futuro. Disponível em: <http://www.tvebrasil.com.br/salto/livro/2sf.pdf>.

BEHRENS, Marilda Aparecida. **Tecnologia interativa a serviço da aprendizagem colaborativa num paradigma emergente**. In: Almeida, M. E. e Moran, J. M. (orgs.) Integração das tecnologias na Educação. Brasília: Ministério da Educação, Seed, 2005, p. 74-79.

BOWDEN, F.P.; TABOR, D. **The friction and Lubrication of Solids**. Oxford Classic Texts, 1950-1954 (Ed. 2008).

BRASIL, **Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+)**. Ciências da Natureza e Matemática e suas tecnologias. Brasília: MEC, 2006.

COTRIM, Gilberto. **História para ensino médio**. São Paulo: Saraiva, 2002. Volume único.

CRASSOUS. L. Bocquet, S. Ciliberto, and C. Laroche, Europhys. **Humidity effect on static aging of dry friction**. Lett. 47, 562 (1999).

ELEY, D. D. and TABOR, D. **Adhesion**, D. D. ELEY, ed., Oxford University Press, London, p. 1-18 (1961).

GIOVANNI, J. R. e Bonjorno, J. R. (2002). **Matemática Completa, volume Único**. São Paulo.

HUTCHINGS, I. M., **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Butterworth-Heinemann, 2001.

JOST, H.P., **Tribology and Lubrication Technology** 62 (3), p. 24-29 (2006).

KAWAKAME, M.S. e BRESSAN, J. D. **Atrito e desgaste em polímeros**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 14, 2000, São Pedro - SP. Anais).

MORAN, J.M. **O vídeo na Sala de Aula**. Revista Comunicação e Educação, n.2, Editora Moderna, 1994.

MOREIRA, M.A. e Masini, E.F.S. (2006) **Aprendizagem significativa: a teoria de aprendizagem de David Ausubel**. São Paulo: Centauro Editora. 2ª edição.

PAZZINI, D. N. A. e ARAÚJO, F. V. **O uso do vídeo como ferramenta de apoio ao ensino-aprendizagem**. UFSM. 2013.

RABINOWICZ, E. **Friction Wear of Materials**. John Wiley and Sons, New York, 1965.

SINATORA, Amilton; TANAKA, Deniol Katsuki. **As leis do atrito: da Vinci, Amontons ou Coulomb?** Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 31-34, 2007.

TOMLINSON B. G.A. Sc. National Physical Laboratory. **A molecular theory of friction**. 1929.

VINCI, Leonardo da. **I Libri di Meccanica [Comp] Arturo Uccelli**. Milão, Ulrico Hoepli, 1940.

VINCI, Leonardo da. **Leonardo da Vinci**. New York, Reynold, sd.

APÊNDICE A - MANUAL DE CONSTRUÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 46

MANUAL DE CONSTRUÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL



Sumário

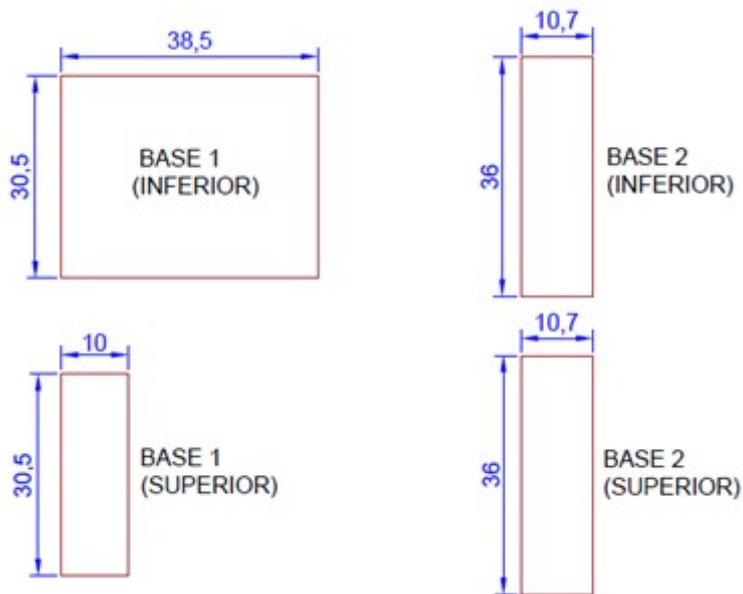
MATERIAL NECESSÁRIO	75
PASSO 1: CORTES DA MADEIRA	76
PASSO 2: DISPOSIÇÃO DOS FUROS	77
PARTE 1: BASE 1 (INFERIOR)	77
PARTE 2: BASE 2 (INFERIOR)	78
PARTE 3: BASE 1 (SUPERIOR)	79
PARTE 4: BASE 2 (SUPERIOR)	80
PARTE 5: CHAPA METÁLICA DE APOIO DO APARATO À BASE	85
PASSO 3: INSTALAÇÃO DOS TRILHOS TELESCÓPICOS	82
PASSO 4: PENTE DE PARAFUSOS DE ENCAIXE DAS FOLHAS	84
PASSO 5: INSTALAÇÃO DO SUPORTE DE TELEVISÃO À PAREDE PARA FIXAÇÃO DO APARATO	85
PASSO 6: MONTAGEM DOS PARAFUSOS	86
PASSO 7: DISPOSIÇÃO DO DINAMÔMETRO	87
PASSO 8: INSTALAÇÃO DA POLIA	88
ESQUEMA DA MONTAGEM FINALIZADA	89
SUGESTÃO PARA CARGAS ELEVADAS	92
PARTE 1: CORTE DA MADEIRA PARA A BASE DE DINAMÔMETROS.....	92
PARTE 2: DISPOSIÇÃO DOS FUROS NA BASE DE MADEIRA DOS DINAMÔMETROS (INFERIOR E SUPERIOR)	92
PARTE 3: DISPOSIÇÃO DOS DINAMÔMETROS	93
PARTE 4: ESQUEMA DA MONTAGEM FINALIZADA	94

MATERIAL NECESSÁRIO

REFERÊNCIA	DESCRIÇÃO	QUANTIDADE
A	MADEIRA (SUGESTÃO: PAINEL COMPONENTE MODULARE TRAMONTINA) 1000x200x18 mm	1
B	BALANÇA DIGITAL (SUGESTÃO: PORTABLE ELECTRONIC SCALE 50kg(0~10kg d=5g)(10~50kg d=10g)	2
C	PARAFUSO ROSCA TOTAL ¼ x 4.1/2	24
D	PARAFUSO ROSCA TOTAL 5/16 x 4.1/2	4
E	ARRUELAS PARA PARAFUSO 1/4	96
F	ARRUELAS PARA PARAFUSO 5/16	16
G	PORCAS PARAFUSO 1/4	72
H	PORCAS PARAFUSO 5/16	12
I	PARAFUSO ROSCA PARCIAL ¼ x 4.1/2	20
J	TRILHO TELESCÓPICO 25 cm	2
K	CHAPA DE AÇO 4 mm (10cm x 32cm)	1
L	SUPORTE DE TELEVISÃO PARA PAREDE	1
M	RODINHA PARA MÓVEIS TRANSPARENTE 50 mm	1
N	BARBANTE	2,0 m
O	TRANSFERIDOR TRANSPARENTE	1
P	DOBRADIÇA METÁLICA PEQUENA	1
Q	APOIO DE MÓVEL DE MADEIRA	4
R	RESMA DE PAPEL A4	1
S	PERFURADOR DE FOLHA	1

PASSO 1: CORTE DA MADEIRA

Neste manual todas as medidas apresentadas estão em centímetros. Faça os desenhos abaixo na tábua de madeira com uso de um lápis ou uma caneta. Os cortes podem ser realizados em uma serraria com um profissional, ou com o uso manual de uma serra, tentando sempre dispor os desenhos na madeira de modo a minimizar o uso de material.

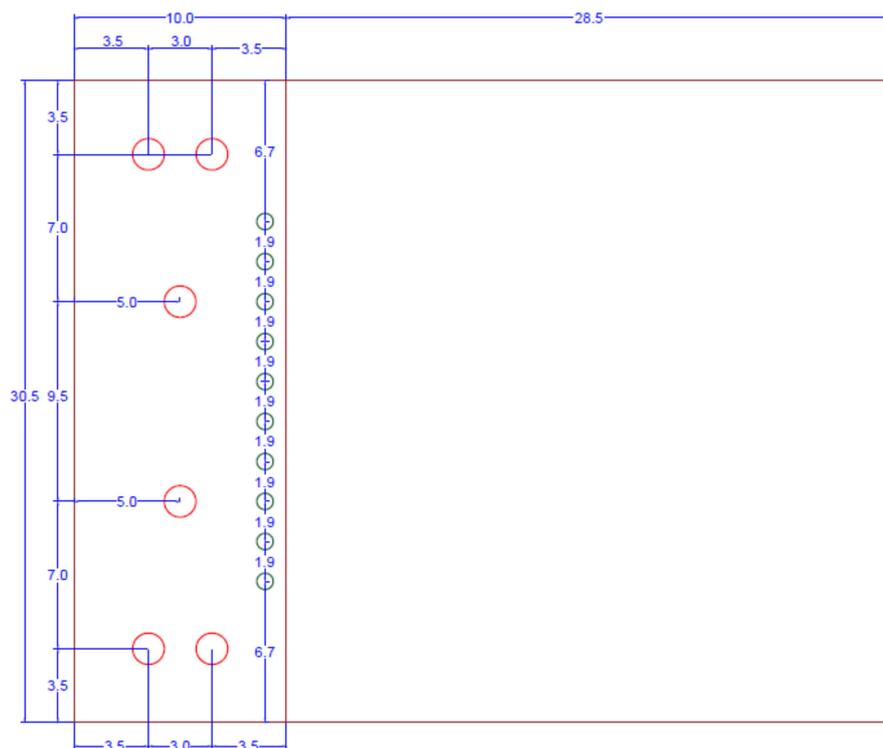


PASSO 2: DISPOSIÇÃO DOS FUROS

Nessa parte do manual, iremos mostrar a disposição dos furos que serão realizados em todas as partes cortadas apresentadas no PASSO 1. **Em todos os furos serão introduzidos os parafusos com a montagem completa apresentada no PASSO 6 deste manual.**

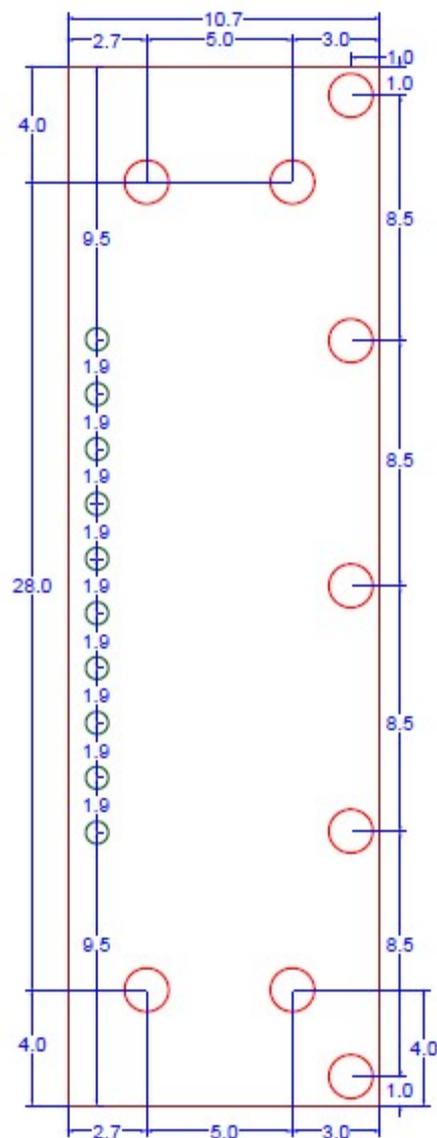
PARTE 1: BASE 1 (INFERIOR)

Os círculos em vermelho representam os furos que deverão ser perfurados com broca de N° 06 e correspondem aos parafusos de referência C. Os círculos em verde representam os furos que deverão ser perfurados com broca de N° 06 e correspondem aos parafusos de referência I.



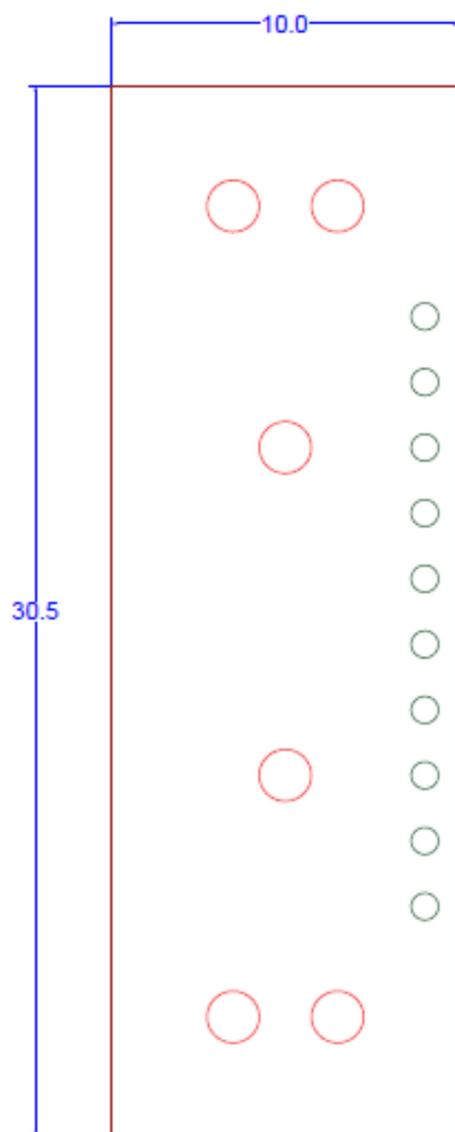
PARTE 2: BASE 2 (INFERIOR)

- Os círculos em vermelho representam os furos que deverão ser perfurados com broca de N° 06 e correspondem aos parafusos de referência C.
- Os círculos em verde representam os furos que deverão ser perfurados com broca de N° 06 e correspondem aos parafusos de referência I.



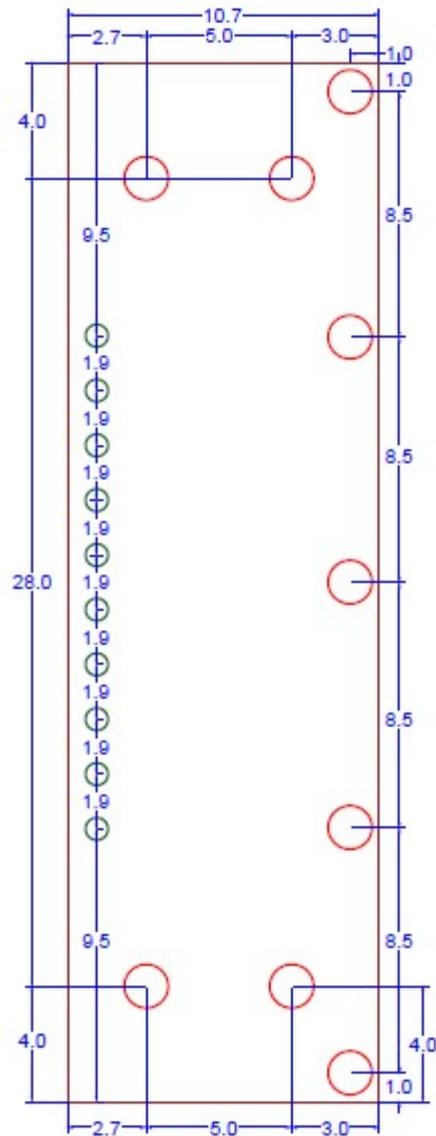
PARTE 3: BASE 1 (SUPERIOR)

OBSERVAÇÃO: A DISPOSIÇÃO DOS FUROS, AS BROÇAS UTILIZADAS E A REFERÊNCIA DE CORES E NUMERAÇÃO DOS PARAFUSOS CORRESPONDENTES SÃO AS MESMAS UTILIZADAS NA PARTE 1 (Pág: 71) DESTE MANUAL.



PARTE 4: BASE 2 (SUPERIOR)

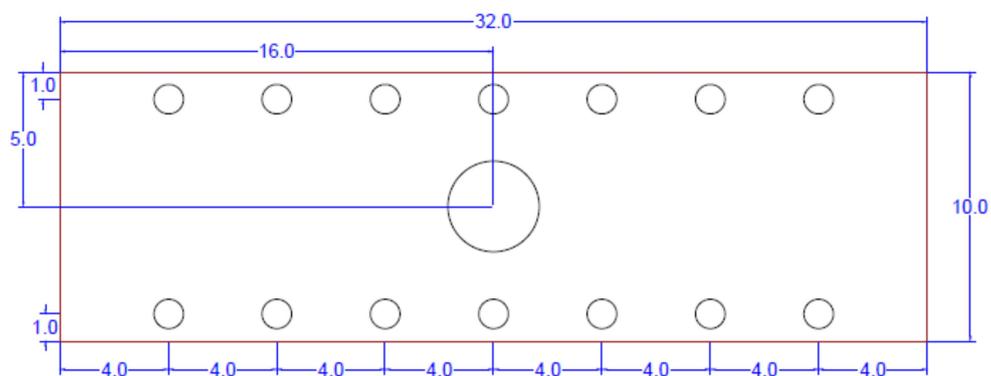
OBSERVAÇÃO: A DISPOSIÇÃO DOS FUROS, AS BROCAS UTILIZADAS E A REFERÊNCIA DE CORES E NUMERAÇÃO DOS PARAFUSOS CORRESPONDENTES SÃO AS MESMAS UTILIZADAS NA PARTE 2 (Pág: 72) DESTE MANUAL.



PARTE 5: DISPOSIÇÃO DOS FUROS NA CHAPA METÁLICA DE APOIO DO APARATO À PAREDE.

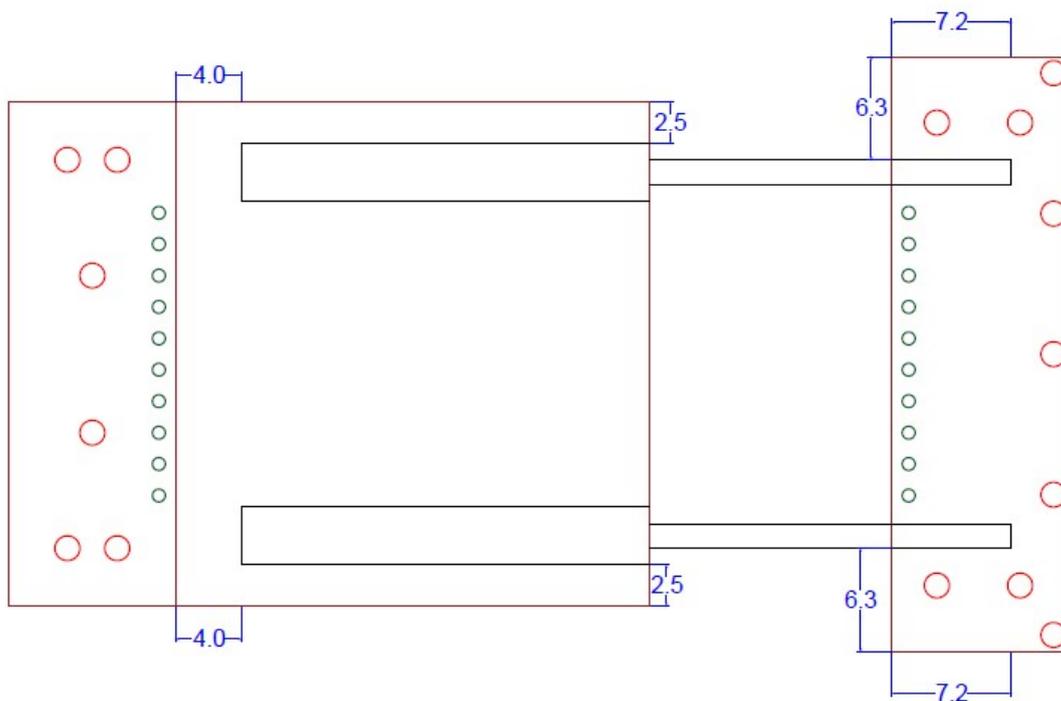
A chapa metálica utilizada é de referência K. O corte da chapa e os furos deverão ser realizados com um serralheiro ou qualquer profissional da área.

Os círculos menores representam furos onde serão introduzidos parafusos rosqueados de cabeça chata fenda PHS de 5 cm e o círculo central maior representa o furo que será introduzido o parafuso rosca total cabeça sextavada 5/16 x 4.1/2 que será preso ao suporte da parede.



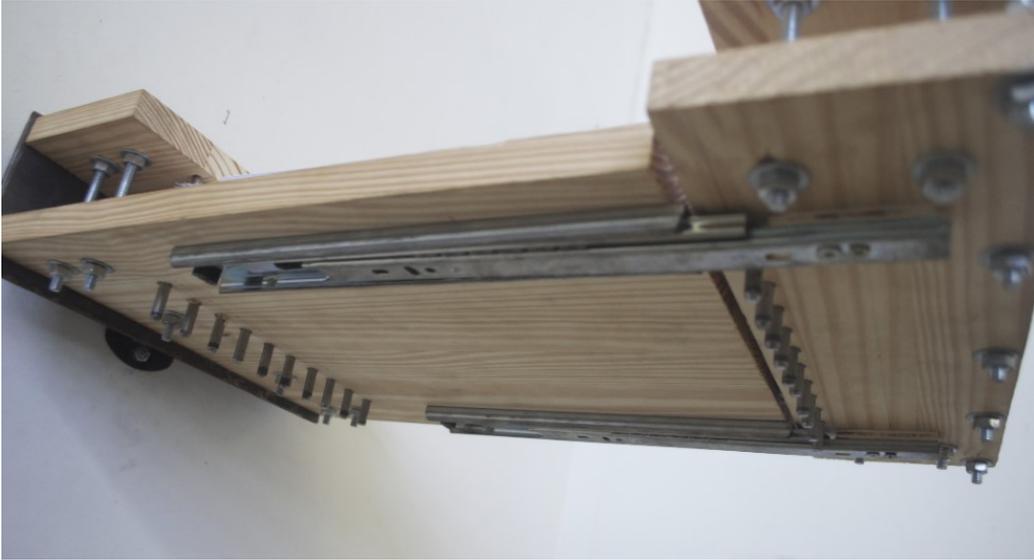
PASSO 3: INSTALAÇÃO DOS TRILHOS TELESCÓPICOS

Os trilhos telescópicos deverão ser instalados sob a BASE 1 e 2 INFERIORES (na parte inferior das estruturas de madeira que servirão como apoio às folhas). Utilize parafusos pequenos, com no máximo 1,5 cm de comprimento (No nosso aparato utilizamos 4 parafusos em cada trilho), para prender os trilhos na madeira.



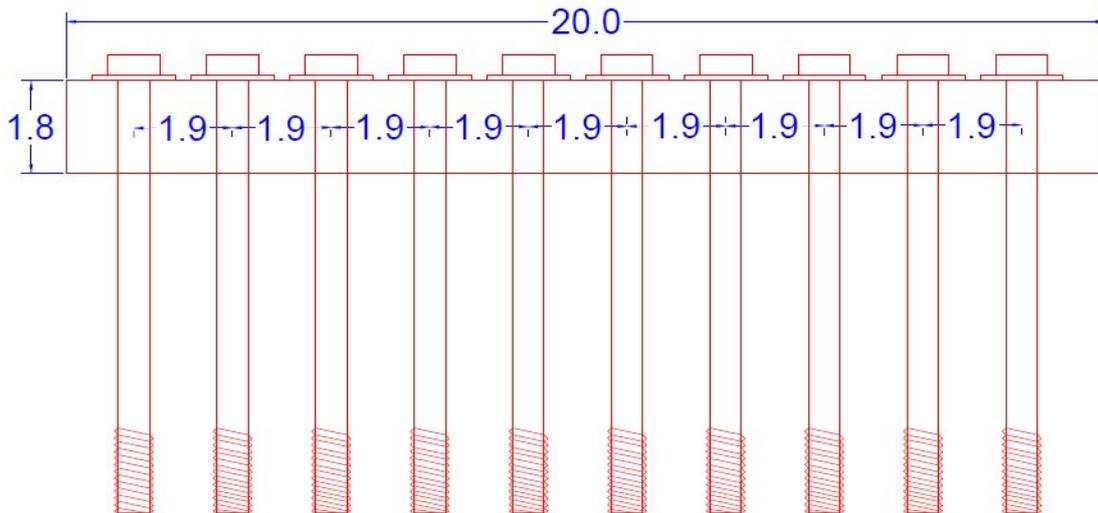
VISTA LATERAL COM A INSTALAÇÃO DOS TRILHOS:





PASSO 4: PENTE DE PARAFUSOS DE ENCAIXE DAS FOLHAS

Como as folhas deverão ser presas de modo a não ter influências de forças externas, além da força gravitacional, será necessária a construção de um pente de parafusos, afim de, facilitar a introdução e retirada das folhas do aparato. Os parafusos utilizados serão os de rosca parcial $\frac{1}{4}$ x 4.1/2.

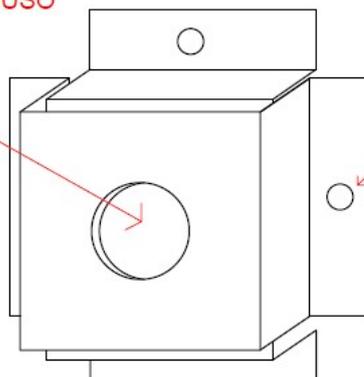


OBSERVAÇÃO: Talvez surja alguma dificuldade em colocar e retirar as folhas do pente por conta da parte rosqueada do parafuso. Caso isso ocorra, será necessário serrar a parte rosqueada, sobrando apenas a parte lisa do parafuso e assim facilitando o procedimento.

PASSO 5: INSTALAÇÃO DO SUPORTE DE TELEVISÃO À PAREDE PARA FIXAÇÃO DO APARATO

Sugestão: A instalação do suporte na parede deve ser feita numa altura aproximada de 90 cm a 100 cm do piso.

FURO PARA PASSAGEM DO PARAFUSO CENTRAL DA CHAPA DE METAL



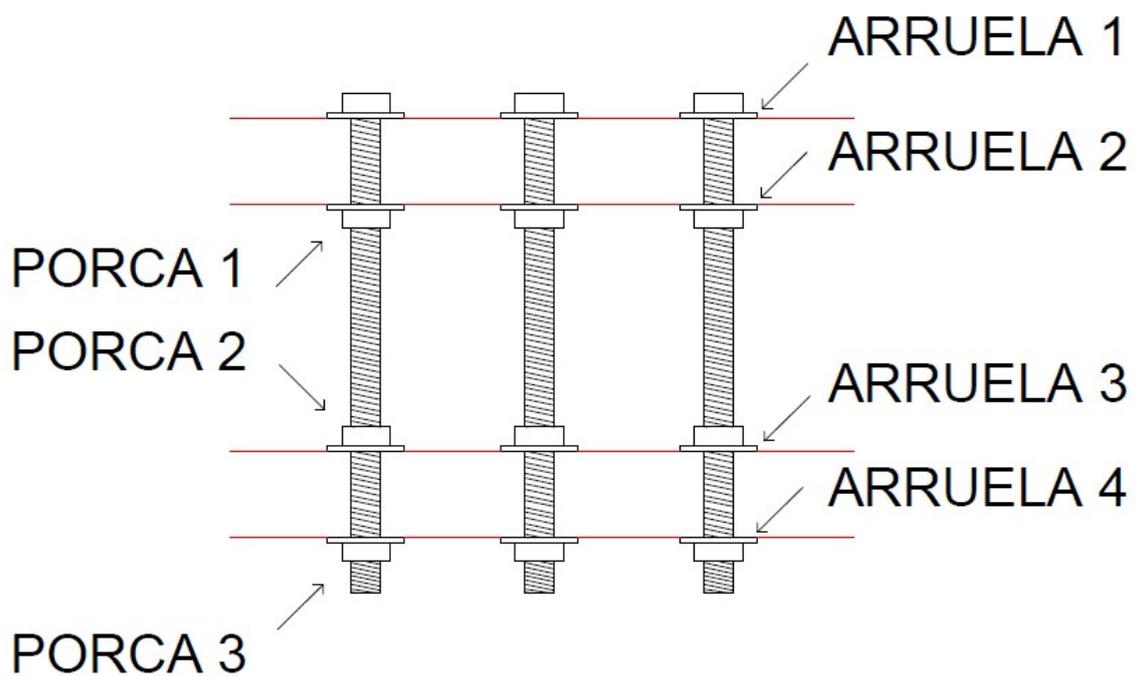
FURO PARA PASSAGEM DO PARAFUSO DE FIXAÇÃO DO SUPORTE À PAREDE



PASSO 6: MONTAGEM DOS PARAFUSOS

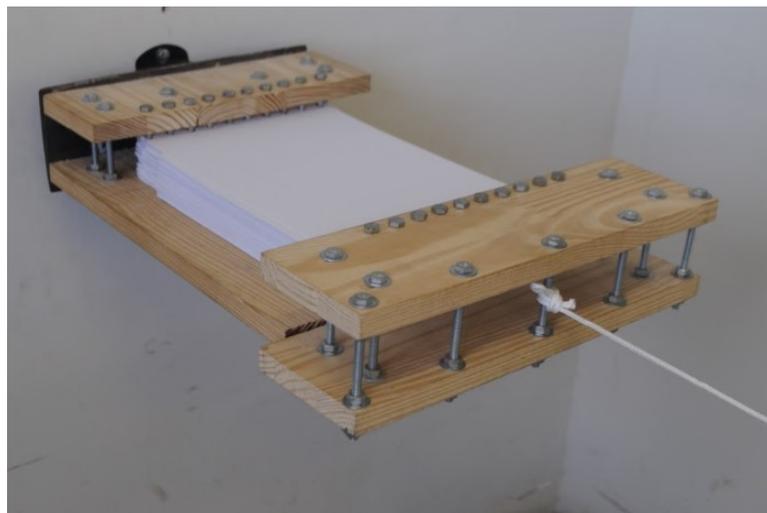
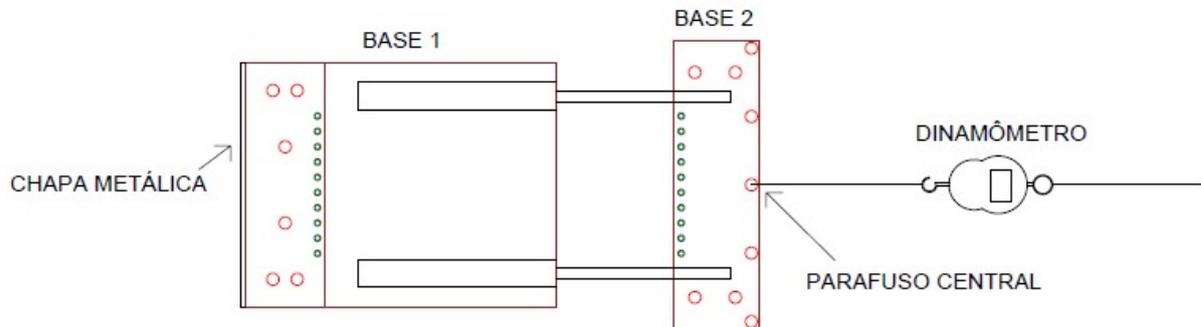
A sequência de componentes na montagem de todos os parafusos do aparato será:

ARRUELA 1 → ARRUELA 2 → PORCA 1 → PORCA 2 →
ARRUELA 3 → ARRUELA 4 → PORCA 3



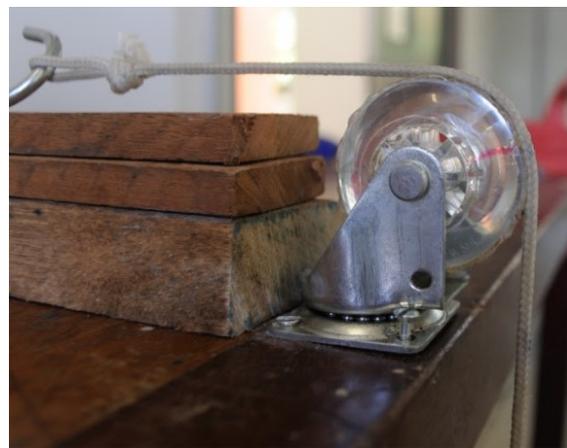
PASSO 7: DISPOSIÇÃO DO DINAMÔMETRO

O dinamômetro deverá ser colocado no parafuso central da base 2. Para o caso de valores de tração acima de 50 kgf ir para a página 86.



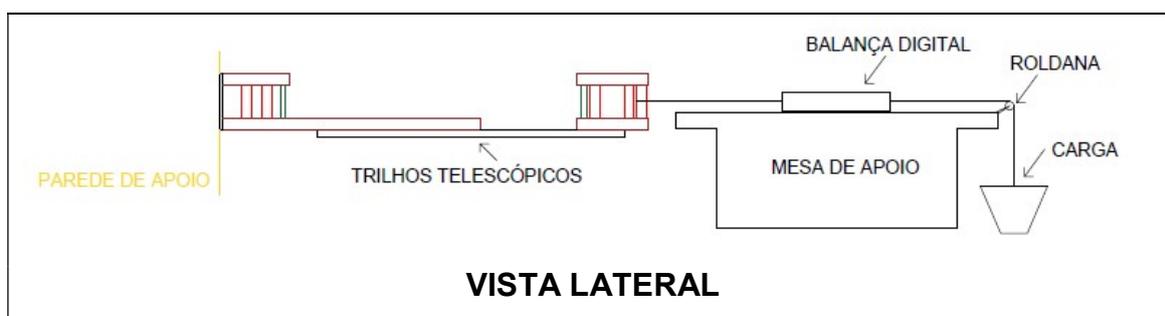
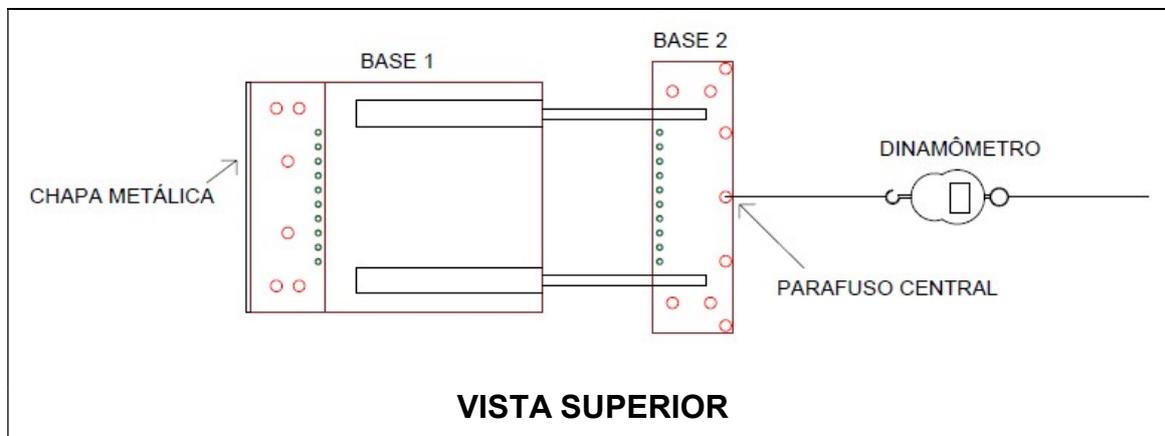
PASSO 8: INSTALAÇÃO DA POLIA

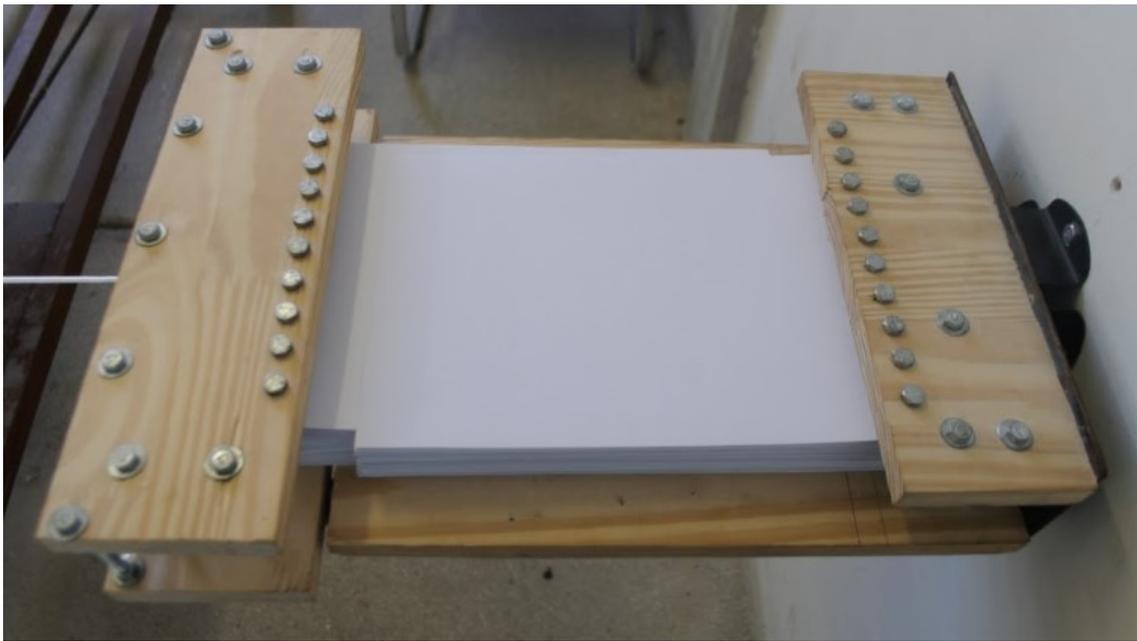
A polia deve ser instalada em algum suporte (como uma mesa resistente) a fim de ser colocado sobre ela o barbante que será ligado ao recipiente (no nosso caso, o garrafão de plástico) que servirá como agente gerador de tração.

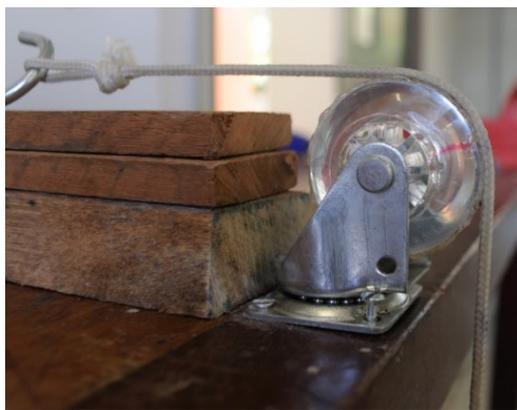
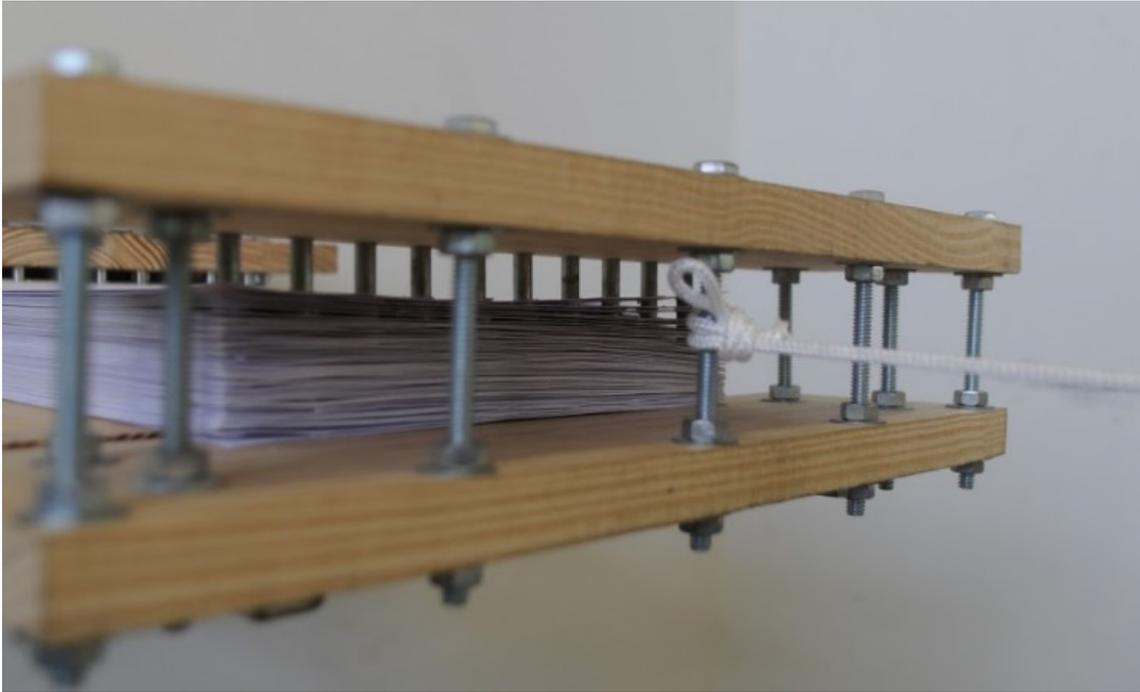


Sugestão: O sulco na rodinha visto nas imagens foi feito com um ferro de solda quente. Sua finalidade é evitar o deslizamento do barbante durante as medições.

ESQUEMA DA MONTAGEM FINALIZADA



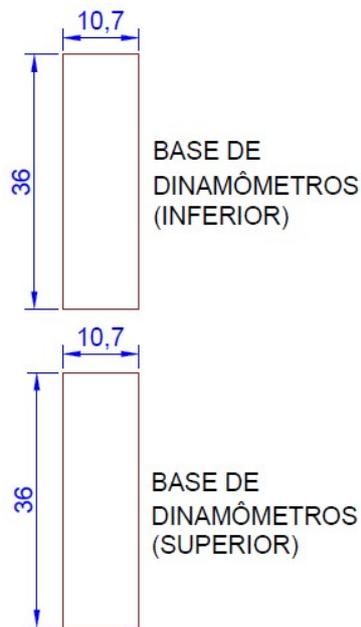




SUGESTÃO PARA CARGAS ELEVADAS

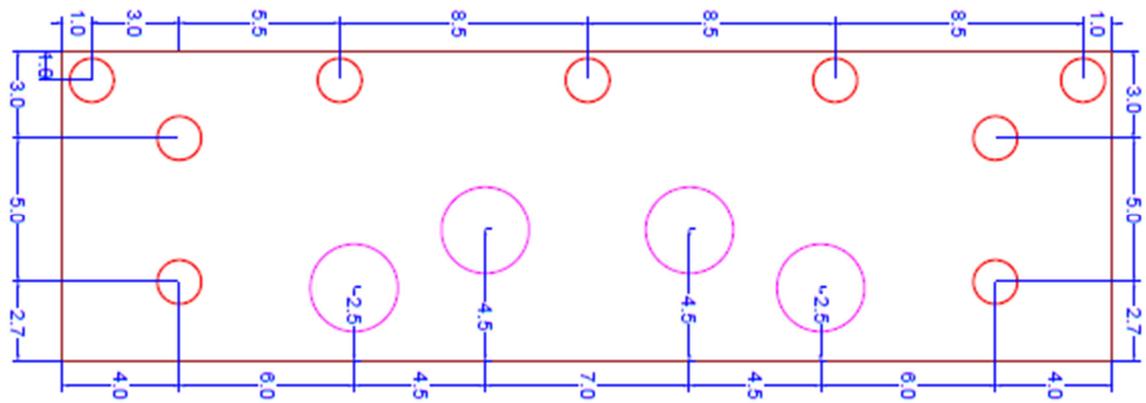
Se as medidas de interesse são para forças de tração elevadas, será necessário o uso de mais de um dinamômetro (O dinamômetro utilizado neste experimento tem leitura máxima de 50 kg). Logo, será necessário construir um aparato para os dinamômetros. Os passos seguintes terão essa finalidade.

PARTE 1: CORTE DA MADEIRA PARA A BASE DE DINAMÔMETROS



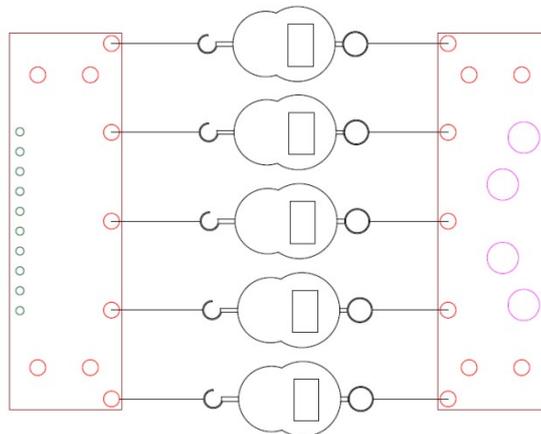
PARTE 2: DISPOSIÇÃO DOS FUROS NA BASE DE MADEIRA DOS DINAMÔMETROS (INFERIOR E SUPERIOR)

- Os círculos em vermelho representam os furos que deverão ser realizados com broca de N° 06 e correspondem aos parafusos de referência C.
- Os círculos em verde representam os furos que deverão ser realizados com broca de N° 06 e correspondem aos parafusos de referência I.
- Os círculos em rosa representam os furos que deverão ser realizados com broca de N° 06 e correspondem aos parafusos de referência D.

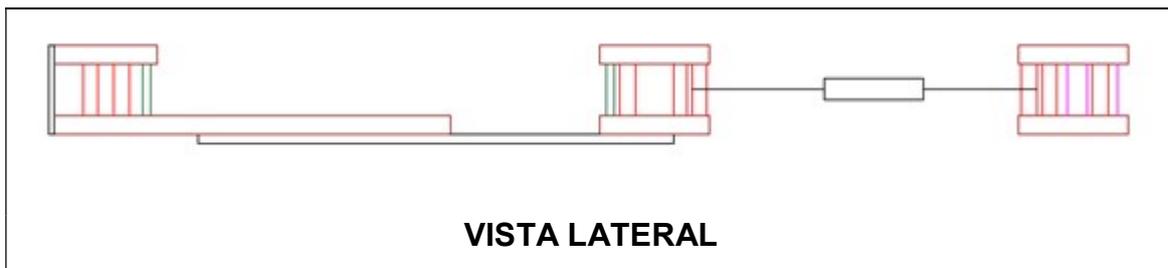
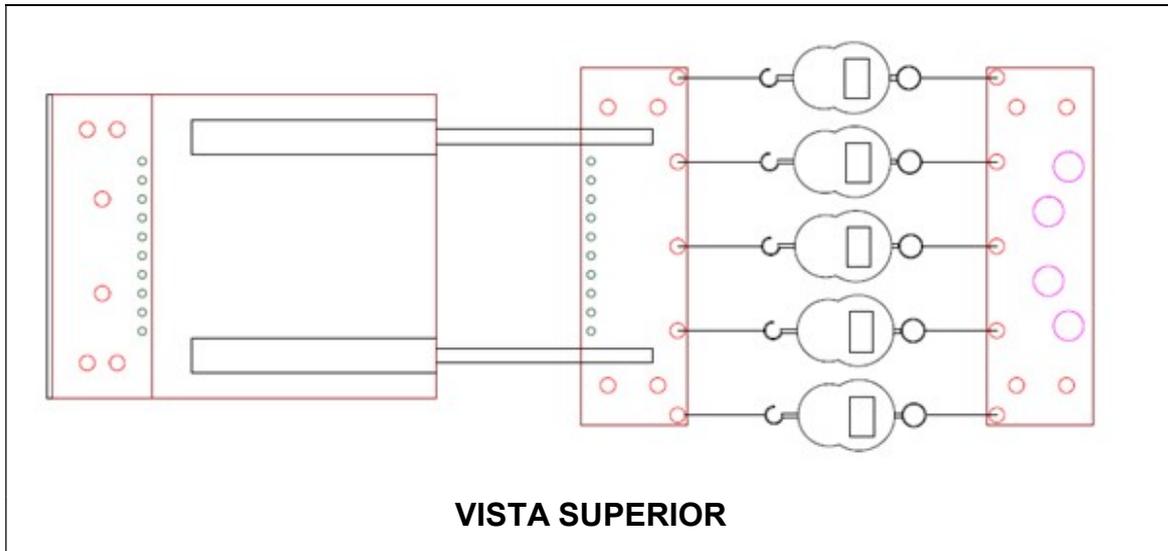


PARTE 3: DISPOSIÇÃO DOS DINAMÔMETROS

Os dinamômetros deverão ser colocados entre a base dos dinamômetros e a base 2.

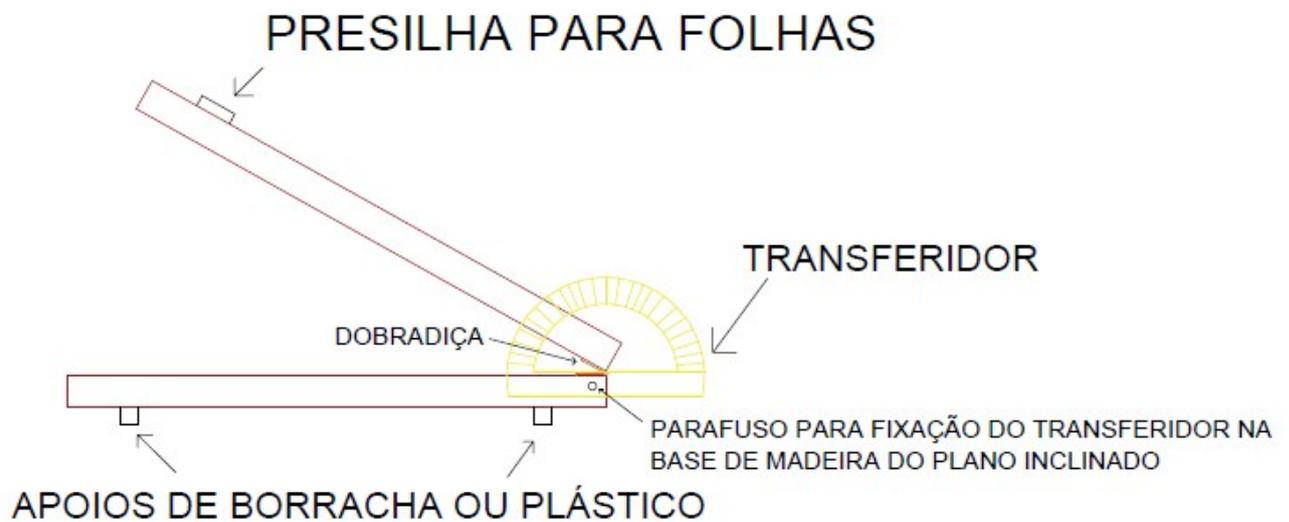


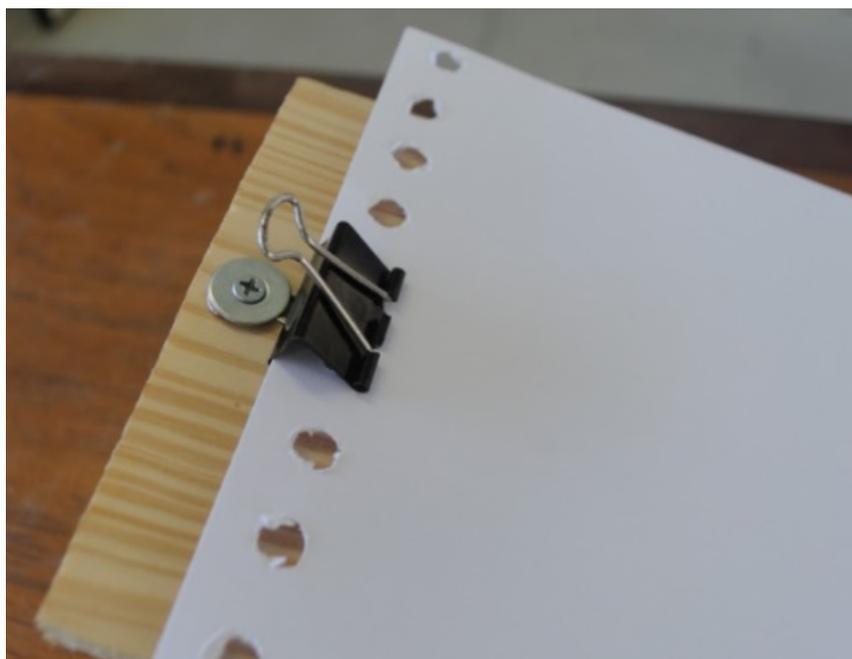
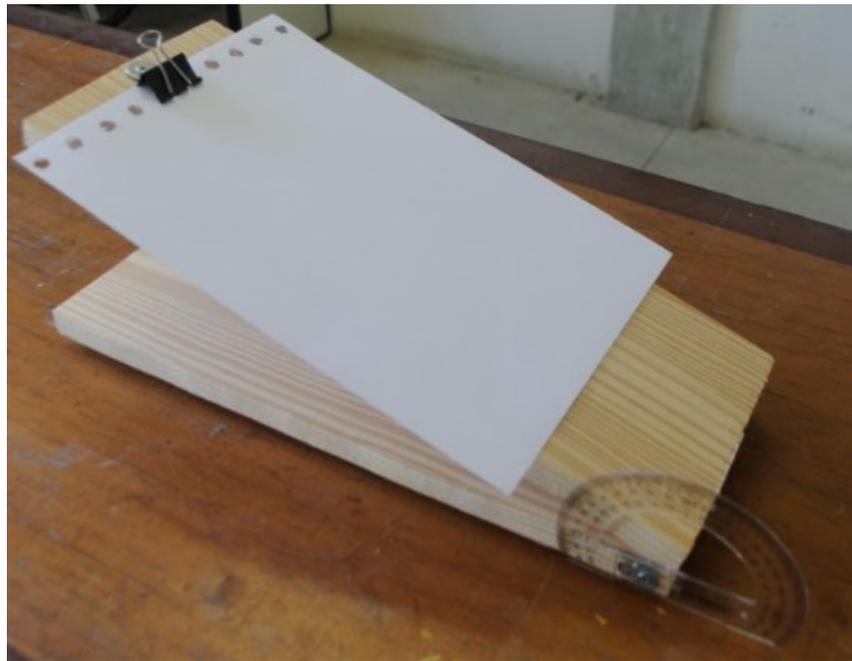
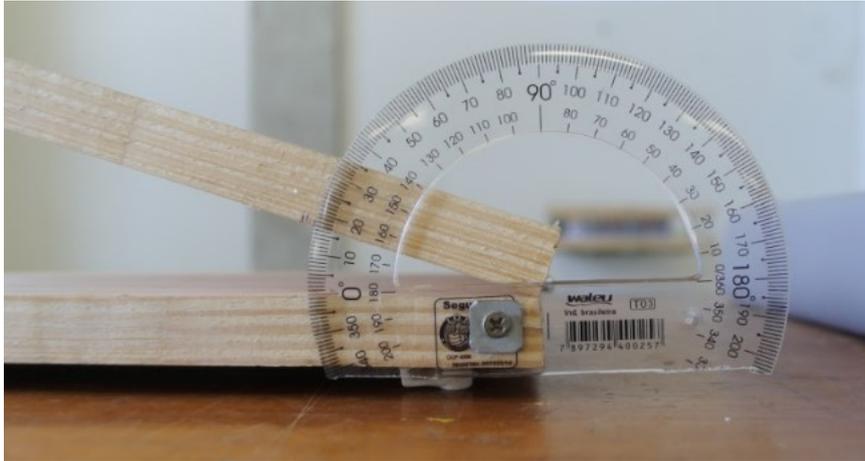
PARTE 4: ESQUEMA DA MONTAGEM FINALIZADA



APÊNDICE B - MANUAL DE CONSTRUÇÃO DO PLANO INCLINADO PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO

As medidas para a construção do plano inclinado ficam a critério do professor. A instalação do transferidor à madeira deve ser feita com atenção, pois o ponto de referência para as medidas dos ângulos do transferidor deve ser alinhado com o centro do eixo da dobradiça.





APÊNDICE C – PRODUTO EDUCACIONAL



ABORDANDO O PROBLEMA DA SEPARAÇÃO DE DUAS LISTAS
TELEFÔNICAS COM SUAS FOLHAS INTERCALADAS COM USO DE
FERRAMENTA AUDIOVISUAL

PRODUTO EDUCACIONAL

Rodolfo de Luna Oliveira

Orientador:
Paulo Henrique Ribeiro Peixoto

Caruaru - Pernambuco
Agosto/2018

APRESENTAÇÃO

Prezado professor.

Em nossa prática docente nos deparamos com situações variadas, tais como turmas com bom rendimento, outras com grau de indisciplina que dificulta a nossa prática, escolas com ótimas ou péssimas infraestruturas, pouco tempo para planejamento das aulas devido à grande carga horária de aulas do docente, escolas com difícil acesso, e tantos outros fatores. Mas esses elementos, não podem interferir de maneira negativa e significativa em nosso papel enquanto educadores, pois ao nosso alcance existem inúmeras possibilidades de intervenções que podem contribuir para a aprendizagem por nossos alunos.

Acreditamos que uma das características de um produto educacional é a sua possibilidade de utilização nas mais variadas condições em ambientes escolares. Então, apresentamos neste trabalho uma ferramenta com custo quase zero para aqueles que queiram aplicá-la, e com abrangência significativa em sua transmissão, com objetivo de facilitar o uso e o acesso ao nosso experimento e estudo. Portanto, uma das melhores estratégias dentro dessas perspectivas é a utilização de uma produção audiovisual que esteja disponível em redes de comunicação, como a internet, pois dificilmente há alguma escola que não tenha uma televisão, um computador ou internet para ter acesso ao nosso trabalho.

Apresentamos aqui uma produção audiovisual com duração aproximada de 10 minutos, na qual abordamos aspectos sobre o tema “atrito entre superfícies sólidas”. Nesse contexto, escolhemos o fenômeno que consiste em tentar separar duas listas telefônicas com suas folhas intercaladas. Para isso, fizemos uso de um artigo publicado em revista científica sobre o fato da quase inseparabilidade das listas telefônicas, analisando suas características e criticando a não observância de certos aspectos. Apresentamos, no vídeo, nosso aparato experimental e os cálculos realizados, sendo estes de fácil acesso aos alunos do Ensino Médio.

Então, esperamos que nosso projeto contribua para sua prática no processo de ensino-aprendizagem e que seus alunos consigam, a partir dos conhecimentos prévios que possuem, desenvolver novos conhecimentos e conseqüentemente consolidar ainda mais o conceito do atrito.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	101
2.	OBJETIVOS.....	103
3.	ACESSO AO PRODUTO EDUCACIONAL.....	104
4.	PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO EM SALA DE AULA.....	105
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	106
	REFERÊNCIAS.....	107

1. INTRODUÇÃO

Os primeiros estudos sobre o atrito foram realizados pelo italiano Leonardo da Vinci e posteriormente aprimorados com as contribuições de *Guillaume Amontons* (1663-1705) e *Charles de Coulomb* (1736-1806). Ao longo de tempo houve vários outros estudos sobre o atrito, sendo alguns mais adequados a sistemas na macroescala e outros na microescala. Este trabalho utilizará como base teórica as leis do atrito propostas por Amontons e Coulomb (Leis de AC), sendo as mesmas ensinadas no programa de atrito do ensino médio (SINATORA, 2007).

São muitos os experimentos de física que servem como exemplos para demonstrar os efeitos do atrito. Como já mencionamos na apresentação, escolhemos para estudo um dos mais intrigantes: a separação de duas listas telefônicas com suas folhas intercaladas. O experimento consiste em unir duas listas telefônicas através das suas folhas, alternando a superposição das folhas de uma das listas com a outra, como mostra a figura 1. A escolha de listas telefônicas deve-se ao fato, principalmente, de possuírem um número elevado de folhas. O objetivo da demonstração é tentar separar as listas puxando cada uma para um lado, mas o interessante é que a força necessária para separá-las torna-se tão elevada que dificilmente o objetivo é alcançado. Esse experimento já foi reproduzido várias vezes e mostrado em canais de TV e Internet, sob várias formas, com o intuito de solucionar o enigma da suposta inseparabilidade.



Figura 1. Intercalando folhas entre dois livros

Em 2008 a série *MythBusters* (Caçadores de Mitos) do canal de televisão *Discovery Channel*, exibiu o episódio “*Phone Book Friction*”, utilizando duas listas

telefônicas com 400 folhas, cada. A equipe do programa tentou separar as listas com um número crescente de pessoas e depois com um carro, mas sem sucesso. Decidiram então utilizar dois tanques militares, conseguindo alcançar aproximadamente 3,6 toneladas-força. A separação ocorreu de fato, porém em condições ainda não satisfatórias, pois algumas folhas foram parcialmente rasgadas antes da separação (MYTHBUSTERS-YOUTUBE, 2018).

O canal de YouTube *Manual do Mundo*, também tentou realizar a separação das listas, com várias pessoas puxando-as e, posteriormente, com dois carros, mas do mesmo modo não conseguiram; as listas rasgam antes (MANUAL1-YOUTUBE, 2018). Por sinal, a explicação dada por esse canal à dificuldade de separação das listas é equivocada, visto que o argumento utilizado é a grande área total encontrada quando somadas todas as áreas individuais das folhas; entretanto as leis de AC defendem que o atrito não tem dependência com a área aparente de contato entre as superfícies (MANUAL2-YOUTUBE, 2018). O mesmo resultado pode ser visto em outro vídeo encontrado na internet, onde foram usados dois caminhões, chegando-se a uma força de 2 toneladas-força (DAVID WILLEY-YOUTUBE, 2018).

Já em maio de 2014, no canal de televisão francês *France 5*, foi ao ar o episódio do programa *On n'est pas que des cobayes* (Não Somos Só Cobaias) com outra tentativa de separação das duas listas telefônicas intercaladas. Na oportunidade, a equipe conseguiu erguer um carro de 600 quilogramas até uma altura de 6 metros, onde entre o braço do guindaste e o carro foram colocadas as listas com suas folhas intercaladas. Mas o que chama a atenção, aqui, é o convite que a equipe do programa fez a um grupo de físicos para tentar desvendar o mistério por trás do poder impressionante do atrito, principalmente nesse contexto experimental. O resultado desse desafio foi publicado em forma de artigo, na conceituada revista científica *Physical Review Letters*, com o título "*Self-Amplification of Solid Friction in Interleaved Assemblies*" (ALÁRCON, 2016). Alguns autores desse mesmo artigo publicaram trabalho também na *Physics Today* (DALNOKI-VERESS, 2016), onde adotaram o termo "*número de Hércules*" para o coeficiente adimensional α encontrado em seu modelo teórico, sendo este o fator matemático principal, segundo os autores, para a explicação do "poder" do atrito na tentativa de separação das listas telefônicas.

Após uma análise do artigo científico e dos argumentos defendidos por Alárcon e colaboradores, percebemos que os autores aparentemente não levaram em consideração a possibilidade de reproduzir o experimento sem o uso de braçadeiras (que correspondem às lombadas das listas telefônicas) e com as folhas dispostas horizontalmente.

Portanto, nosso trabalho teve como etapas:

- A construção de um aparato experimental que eliminasse o uso das braçadeiras, e com as folhas dispostas horizontalmente, pois assim a única força que pressiona uma folha contra a outra decorre do peso de cada folha.
- A elaboração de uma expressão para o módulo da força \vec{F} necessária à separação das listas telefônicas, à luz dos conhecimentos de física e matemática, podendo ser elemento de estudo para alunos de Ensino Médio.
- A divulgação dos nossos resultados experimentais para a intensidade da força \vec{F} .
- A apresentação de uma análise crítica do trabalho de Alárcon e seus colaboradores.

Tentamos em nosso vídeo apresentar cada etapa do trabalho, e nossas conclusões, de maneira sucinta e com linguagem de fácil compreensão para nosso público alvo.

2. OBJETIVOS

Nosso objetivo foi o desenvolvimento de um produto educacional com possibilidades de uso em sala de aula tanto pelo professor, como também pelo aluno, sobre o tema atrito, envolvendo o problema da dificuldade de separação de duas listas telefônicas com suas folhas intercaladas, a partir de uma investigação de um estudo divulgado em revista científica. Como também, a apresentação de uma proposta experimental do aparato utilizado em nosso estudo, presente no apêndice A deste trabalho.

3. ACESSO AO PRODUTO EDUCACIONAL

Nossa produção audiovisual teve como colaboradores em sua construção as empresas de comunicação *BAK COMUNICAR*⁵ e *ITAPUÃ VÍDEO E COMUNICAÇÃO*⁶. O acesso ao nosso produto educacional pode ser realizado através do link abaixo:

<https://www.youtube.com/watch?v=LzxIITQUB-o>



Figura 2. Instantâneos do nosso vídeo.

⁵ Empresa com sede na cidade de Vitória de Santo Antão/PE. Seus trabalhos estão voltados à produção de áudios e vídeos empresariais, governamentais, políticos e pessoais, seja para televisão, rádio ou web.

⁶ Empresa responsável pelas edições do vídeo e áudios da filmagem.

4. PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO EM SALA DE AULA

O modo como o professor irá utilizar nosso vídeo nas aulas de atrito ficará a seu critério. Mas podemos apresentar algumas orientações que julgamos ser importantes para uma melhor aplicação do produto:

- Nosso vídeo tem duração de 10 minutos, aproximadamente. Logo, o professor terá condições de iniciar uma discussão com seus alunos e realizar atividades acerca do vídeo, considerando para isso uma aula com 50 minutos de duração.

- É necessário que os alunos já tenham conhecimentos prévios acerca dos conceitos e definição matemática da força de atrito, pois assim a problemática apresentada no vídeo será melhor assimilada pelos alunos.

- Durante o vídeo são dadas sugestões de links de outros vídeos que mostram tentativas de separação das listas telefônicas; então, o professor poderá acessar esses vídeos e reproduzi-los durante a reprodução do nosso, ou, se preferir, assisti-los anteriormente ou posteriormente o uso do nosso vídeo.

- Os materiais necessários para o uso do vídeo são basicamente: uma televisão ou datashow com computador, sistema de som, e se o vídeo não estiver salvo em alguma plataforma off-line ou disco rígido (pendrive, CD, HD,...), será necessário então o acesso à internet.

4.1. ALGUMAS SUGESTÕES DE PERGUNTAS PARA A DISCUSSÃO DO VÍDEO

Abaixo estão algumas perguntas que consideramos interessantes e que podem ser feitas aos alunos, sendo as mesmas utilizadas em nossa aplicação em sala de aula.

1. Vocês compreenderam o papel das braçadeiras, quanto à dificuldade de separar as listas?

2. O que motivou a construção do nosso experimento?
3. Como vocês explicam esse rápido crescimento com o número de folhas da força para separar as listas?
4. Percebam que, segundo os cálculos apresentados em nosso trabalho, a força para separar as listas depende do coeficiente de atrito entre as folhas. Então, como podemos encontrar esse valor utilizando o aparato construído?
5. Comentamos ao final do vídeo que estudos sobre o atrito são importantes. Na opinião de vocês, em que situações do cotidiano, em qualquer área, o atrito é um fator que interfere de maneira tão significativa a ponto de o levarmos em consideração?

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sabemos que um vídeo com duração de 10 minutos aplicado e discutido durante uma aula ou em algumas horas não pode ser considerado como um ótimo ou único parâmetro para afirmar categoricamente que ocorreu de fato a aprendizagem de todos os alunos atingidos. A aprendizagem é algo que precisa de continuidade e tempo para termos resultados satisfatórios. Então, nosso trabalho é uma estratégia a ser utilizada em um dado momento dessa longa sequência de sucessivos aprendizados. Alguns pontos positivos em sua utilização são o fácil acesso, a liberdade do professor em utilizá-lo da maneira que lhe convém, sem custos financeiros para seu uso, e que possa ser assistido quantas vezes for necessário. Então, cabe ao professor, em conjunto com a escola, planejar as melhores táticas a serem aplicadas para contribuir com a construção do conhecimento dos alunos.

REFERÊNCIAS

[DAVIDWILLEY-YOUTUBE, 2018] “David Willey - **Tearing two interlaced phone books apart using two 18 wheeler trucks**”: <https://youtu.be/qjKpQxIIIUw>. Acesso em junho de 2018.

[MANUAL1-YOUTUBE, 2018] “Manual do Mundo - **Livros que grudam sem cola**”: <https://youtu.be/bCTL0PQPOj0>. Acesso em junho de 2018.

[MANUAL2-YOUTUBE, 2018] “Manual do Mundo - **Será que a lista aguenta dois carros?**”: <https://youtu.be/oMUDUmJ-d5s>. Acesso em junho de 2018.

[MYTHBUSTERS-YOUTUBE, 2018] “MythBusters no IMDb (**“Phone Book Friction”**)”: <https://www.imdb.com/title/tt1266951>. Acesso em junho de 2018.

ALÁRCÓN H., T. Salez, C. Poulard, J.-F. Bloch, E. Raphael, K. Dalnoki-Veress e F. Restagno. **Self-Amplification of Solid Friction in Interleaved Assemblies**. Physical Review Letters 116, 015502 (2016).

DALNOKI-VERESS. K., SALEZ. T., RESTAGNO. F. **Why can't you separate interleaved books?** Physics Today 69, 6, 74 (2016).

[RODOLFO LUNA-YOUTUBE, 2018] “**Abordagem alternativa para o problema da separação de duas listas telefônicas**”: <https://www.youtube.com/watch?v=LzxIITQUB-o>

SINATORA, Amilton; TANAKA, Deniol Katsuki. **As leis do atrito: da Vinci, Amontons ou Coulomb?** Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 31-34, 2007.