



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CAMPUS AGRESTE
NÚCLEO DE FORMAÇÃO DOCENTE
CURSO DE FÍSICA-LICENCIATURA

JOSÉ CLEMENTINO DA SILVA FILHO

MODELO DE EXPERIMENTO PARA ESTUDO DO ATRITO: Construção de um tribômetro motorizado para ensino experimental sobre coeficiente de atrito estático por meio de software de videoanálise

Caruaru

2023

JOSÉ CLEMENTINO DA SILVA FILHO

MODELO DE EXPERIMENTO PARA ESTUDO DO ATRITO: Construção de um tribômetro motorizado para ensino experimental sobre coeficiente de atrito estático por meio de software de videoanálise

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Licenciatura em Física do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de monografia, como requisito parcial para a obtenção do grau de licenciado em Física.

Área de concentração: Ensino de Física experimental.

Orientador : Prof. Dr. Ernesto Arcenio Valdés Rodriguez

Caruaru

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva Filho, José Clementino da.

Modelo de experimento para o estudo do atrito: Construção de um tribômetro motorizado para ensino experimental sobre coeficiente de atrito estático por meio de software de videoanálise / José Clementino da Silva Filho. - Caruaru, 2023.

48 p. : il., tab.

Orientador(a): Ernesto Arcenio Valdés Rodríguez

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Física - Licenciatura, 2023.

Inclui referências, apêndices.

1. Coeficiente de Atrito estático. 2. Ensino de Física experimental. 3. Software Tracker. I. Rodríguez, Ernesto Arcenio Valdés. (Orientação). II. Título.

530 CDD (22.ed.)

JOSÉ CLEMENTINO DA SILVA FILHO

MODELO DE EXPERIMENTO PARA ESTUDO DO ATRITO: Construção de um tribômetro motorizado para ensino experimental sobre coeficiente de atrito estático por meio de software de videoanálise

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Física - Licenciatura do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de monografia, como requisito parcial para a obtenção do grau de licenciado em Física.

Aprovada em: 03/10/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ernesto Arcenio Valdés Rodriguez (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Paulo Henrique Ribeiro Peixoto (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Heydson Henrique Brito da Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Gostaria de dedicar este trabalho à minha família, em especial aos meus amados pais, Zito e Sanção, minha querida avó, Maria, por todo apoio e incentivo ao longo da minha formação. Dedico também à minha namorada, Duda por confiar no meu potencial, sendo minha razão para não desistir.

AGRADECIMENTOS

Quero por meio desse texto expressar minha gratidão primeiramente a Deus, por tanto me abençoar até aqui, e aos meus pais, Zito e Sanção, cujo apoio, compreensão e força foram deveras importantes nesta jornada. Junto à minha avó, Maria, pelos conselhos e orações.

Agradeço infinitamente ao meu orientador, Ernesto “El Hombre” Valdés, por toda preocupação, carisma e ensinamentos, que me mostrou o verdadeiro sentido de ser um professor de Física. Também quero agradecer aos professores da banca examinadora, Paulo Peixoto e Heydson Brito, exímios docentes que muito me ajudaram no decorrer do curso. Todos vocês são inspiradores.

Gratidão aos meus familiares por todo apoio moral e por esse voto de confiança, especialmente à minha companheira de vida, Duda, obrigado por estar comigo em todas circunstâncias, você tem sido a luz que ilumina minha trajetória.

Gostaria de estender meus agradecimentos a todos que contribuíram para o meu desenvolvimento, meus amigos de caminhada, Bruno, Clarice, Eloá, Jonathan, Jacó, JP, Milena, Selmitha, RX e Thiago, e principalmente sou grato ao meu irmão de coração, Samuel, por todos os momentos que passamos juntos, fomos a melhor dupla.

Aos coordenadores pedagógicos das Instituições que trabalho atualmente, Luciene, Flávio e Jânio, em especial a Eduardo, por todos os conselhos e pela grande amizade que construímos. Por último, mas não menos importante, desejo expressar minha gratidão aos meus alunos por sempre me acolherem até nos dias mais conturbados.

À CAPES pelas bolsas de iniciação à docência, e à PROAES pelos auxílios estudantis, que permitiram meu aprimoramento da prática pedagógica e me fizeram continuar no curso até o fim.

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a beleza libertadora do intelecto para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer”.
(EINSTEIN, 1933)

RESUMO

A compreensão do atrito evoluiu significativamente ao longo da história, passando desde suas primeiras concepções sobre a relação de independência da força de atrito com a área aparente de contato entre as superfícies, para uma visão mais profunda que considera as interações moleculares e a influência de fatores como a rugosidade das superfícies, surgindo o conceito de área efetiva de contato. Leonardo da Vinci (1452-1519) foi um dos preceptores a estudar a fricção entre superfícies, sintetizando leis empíricas a respeito desse fenômeno. O atrito é sempre uma temática ativa de pesquisa e aplicação em diversos ramos da ciência além do ensino de Física Experimental. O coeficiente de atrito estático é uma medida crucial para entender a resistência ao movimento de objetos em repouso, sendo essencial em diversas aplicações práticas. Este trabalho aborda o conceito fundamental do coeficiente de atrito estático e sua relação com a força de atrito numa superfície que sofrerá mudanças de inclinação. A pesquisa se baseia em experimentação prática com um modelo produzido para o ensino de Física experimental, utilizando um programa de videoanálise, o *Tracker*, como ferramenta essencial para coleta de dados. Os valores recém-descobertos serão discutidos e comparados, para se ter uma noção do quão este modelo de plano inclinado motorizado junto ao software *Tracker* pode vir a ser eficiente para a investigação de fenômenos de origem tribológica.

Palavras-chave: Coeficiente de Atrito estático; Ensino de Física experimental; *Software Tracker*.

ABSTRACT

The understanding of friction has significantly evolved throughout history, moving from simplistic notions to a deeper perspective that considers molecular interactions and the influence of factors such as surface roughness. Leonardo da Vinci (1452-1519) was one of the precursors to study the friction between surfaces, synthesizing empirical laws regarding this phenomenon. Friction remains an actively researched and applied topic in various branches of science beyond experimental Physics teaching. The static friction coefficient is a crucial measure for understanding the resistance to the movement of objects at rest, being essential in various practical applications. This work addresses the fundamental concept of the static friction coefficient and its relationship with the frictional force on a surface undergoing changes in inclination. The research is based on practical experimentation with a model designed for experimental physics education, using a video analysis software, Tracker, as an essential tool for data collection. The newly discovered values will be discussed and compared to gain an understanding of how effective this motorized inclined plane model, together with the Tracker software, can be for investigating tribological phenomena.

Keywords: Static Friction Coefficient; Experimental Physics teaching; Software Tracker.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Tribômetros de da Vinci	15
Figura 2 –	Modelo idealizado por Euler	16
Figura 3 –	Modelo de e Bowden e Tabor	17
Figura 4 –	Diagrama de forças atuantes num corpo sobre um plano inclinado	19
Gráfico 1 –	Módulo das forças de atrito estático e cinético	20
Figura 5 –	Diagrama de forças atuantes num corpo sobre uma superfície horizontal	22
Figura 6 –	Modelo experimental do plano inclinável motorizado	30
Figura 7 –	Faces deslizantes ampliada em 60x	31
Figura 8 –	Captura do <i>Tracker</i> (dinamômetro arrastando o bloco de fórmica)	36
Figura 9 –	Captura do <i>Tracker</i> (bloco de fórmica sobre plano inclinado)	37
Figura 10 –	Captura do <i>Tracker</i> (dinamômetro arrastando o bloco de metal e borracha)	38
Figura 11 –	Captura do <i>Tracker</i> (bloco de metal e borracha sobre plano inclinado)	39
Figura 12 –	Captura do <i>Tracker</i> (dinamômetro arrastando o bloco de gesso)	41
Figura 13 –	Captura do <i>Tracker</i> (bloco de gesso sobre plano inclinado)	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Intervalo dos valores que pode assumir μ_e de acordo com a angulação da rampa	23
Tabela 2 –	Massa dos blocos	33
Tabela 3 –	Medidas do atrito estático (dinamômetro arrastando o bloco de fórmica)	36
Tabela 4 –	Medidas para o atrito estático (bloco de fórmica no plano inclinado)	37
Tabela 5 –	Medidas do atrito estático (dinamômetro arrastando o bloco de metal e borracha)	39
Tabela 6 –	Medidas para o atrito estático (bloco de metal e borracha no plano inclinado)	40
Tabela 7 –	Medidas do atrito estático (dinamômetro arrastando o bloco de gesso)	41
Tabela 8 –	Medidas para o atrito estático (bloco de gesso no plano inclinado)	42
Tabela 9 –	Média e Desvio padrão da amostra dos coeficientes de atrito estático	43
Tabela 10 –	Diferença percentuais nos dois casos descritos	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	O CONCEITO DE ATRITO AO LONGO DOS TEMPOS.....	14
2.1	AS LEIS DO ATRITO E SUAS PROPRIEDADES.....	14
2.2	O COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO E METÓDOS PARA DETERMINÁ-LO.....	18
3	ENSINO EXPERIMENTAL.....	25
4	METODOLOGIA.....	27
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	28
4.2	ARRANJO EXPERIMENTAL.....	29
4.3	SOFTWARE TRACKER.....	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
5.1	BLOCO DE FÓRMICA.....	35
5.2	BLOCO DE METAL E BORRACHA.....	38
5.3	BLOCO DE GESSO.....	40
6	CONCLUSÕES.....	43
	REFERÊNCIAS.....	45
	APÊNDICE A – REGISTRO DA CONSTRUÇÃO E PRÁTICA DO MODELO EXPERIMENTAL.....	48

1 INTRODUÇÃO

Enquanto uma ciência de cunho experimental, a Física deve estar sempre atrelada aos benefícios que os avanços dessa prática trouxeram para sociedade, sendo assim, estabelecer um vínculo com essa área é essencial. Araújo e Abib (2003) destacam aspectos fundamentais em defesa da prática experimental por ter a capacidade de estimular a participação ativa dos alunos, o que favorece um melhor envolvimento com o aprendizado do mesmo, despertando sua curiosidade, empenho e interesse.

A fricção é uma força resistiva que surge sempre que objetos entram em contato e tentam deslizar um sobre o outro. Ela é resultado da interação entre as irregularidades microscópicas das superfícies dos materiais envolvidos. A análise experimental da força de atrito estático constitui um campo de estudo muito vasto para a compreensão de alguns princípios fundamentais da dinâmica newtoniana e sua aplicação prática em situações cotidianas.

O atrito estático, uma força resistente que surge quando dois corpos estão em contato, mas sem movimento relativo, desempenha um papel significativo em sistemas em equilíbrio sob a influência de forças externas. Isso significa que, enquanto os objetos permanecerem em repouso um em relação ao outro, o atrito estático impede que eles comecem a se mover.

Há variados exemplos da importância do estudo da fricção, ainda assim é comum em questões, cujo enunciado informa para considerar a força de atrito entre o corpo e a superfície sendo desprezível. Isso pode distorcer a premissa de que não há material perfeitamente liso a ponto de seus coeficientes de atrito, estático (μ_e) ou cinético (μ_c), sejam nulos. Entretanto, os modelos de estudo geralmente são desenvolvidos em níveis crescentes de sofisticação, desprezar o atrito em um primeiro momento pode ser uma estratégia didática interessante.

A escolha feita para abordar a pesquisa desenvolvida está diretamente ligada ao arranjo experimental e como seria replicá-lo, isto é, possibilitar maneiras de que seja adotado numa proposta de ensino experimental sobre determinação de coeficientes de atrito, tendo estrutura de aulas laboratoriais.

Nesse contexto, pode-se investigar até que ponto as leis empíricas do atrito são válidas, utilizando um experimento confeccionado a fim de simular um tribômetro,

medindo o coeficiente de atrito estático máximo em blocos de madeira, borracha e gesso. Este estudo propõe a construção de um plano que possa ajustar sua inclinação de forma motorizada como um experimento que tem o propósito de investigar as características do coeficiente de atrito estático.

O objetivo deste trabalho é construir um instrumento de ensino experimental que permita facilitar a análise e coleta de dados auxiliado por uma câmera de *smartphone* e um *software* de videoanálise. Consiste num tribômetro, que “é um equipamento versátil para medição de propriedades de atrito e desgaste de combinações de materiais e lubrificantes sob condições específicas de carga, velocidade, temperatura e atmosfera.” (RADI *et al.* 2007, p. 4).

Diferentemente dos trabalhos de Mossman *et al.* (2002), Amaral (2013) e Teles *et al.* (2021), que utilizam sistemas automatizados por meio de sensores eletrônicos para aquisição de dados, o experimento a seguir, trata-se de um plano inclinado ajustável e motorizado, a partir de manipulação controlada do ângulo de inclinação, afetando a força normal, sendo complementada com a utilização de um software de modelagem e análise de gravações, possibilitando a medição precisa a respeito das angulações, levando em consideração possíveis fontes de erro.

Matuo e Marinelli (2007) abordam um tópico crucial no campo da pesquisa experimental: a avaliação e consideração adequada dos erros em experimentos científicos, com foco específico na caracterização do atrito estático, uma temática muito similar à que é desenvolvida neste trabalho.

O processo para obtenção dos valores de μ_e será realizado por intermédio de um programa computacional denominado *Tracker Video Analysis and Modeling Tool*. A partir dele será verificado se o coeficiente de atrito estático possui dependência ou não do material utilizado, da área de contato entre as superfícies em movimento relativo e, principalmente, da inclinação da rampa.

A pesquisa, em si, mostra um comparativo entre duas perspectivas, com três blocos de materiais distintos, com diferentes dimensões. No primeiro caso os objetos são puxados por um dinamômetro interligado ao motor num plano horizontal; já no segundo caso, o corpo é colocado sobre a rampa, que se inclina até a angulação crítica. Em ambas circunstâncias é factível descobrir μ_e , dessa forma este trabalho busca unir a tecnologia com experimentação e direcioná-los ao estudo de modelos teóricos da Física.

2 O CONCEITO DE ATRITO AO LONGO DOS TEMPOS

As noções atribuídas à força de atrito evoluíram historicamente, passando por diferentes estágios de compreensão e desenvolvimento. A ideia de atrito, ou a resistência ao movimento relativo entre duas superfícies em contato, tem sido uma ocupação fundamental em várias disciplinas, incluindo a física, a engenharia, a ciência dos materiais, etc.

A área do conhecimento que se dedica ao estudo do atrito é chamada de Tribologia. Uma ciência que se concentra na interação de superfícies que se friccionam e abrange uma ampla gama de aplicações, incluindo a própria mecânica. De acordo com Sinatora (2005, p. 1) “A tribologia se dedica, ao estudo do desgaste, do atrito e, por conseguinte, da lubrificação, como forma tradicional de minimizar aqueles dois fenômenos.”

A fim de aprimorar a compreensão desse fenômeno, este capítulo se propõe a explanar as leis do atrito e as várias concepções a respeito desse fenômeno, esse arcabouço teórico é fundamental para distinguir agentes físicos que influenciam ou não a fricção entre os corpos.

2.1 AS LEIS DO ATRITO E SUAS PROPRIEDADES

Gaspar (2016, p. 349) faz um resumo em seu livro, de forma sucinta, a apontar o contexto histórico para o estudo do atrito que começa no século XIV, onde Leonardo da Vinci (1452-1519), pintor renascentista e cientista italiano, concluiu experimentalmente que a força de atrito entre dois corpos sobrepostos tinham propriedades específicas que ele formulou empiricamente, conhecidas como leis do atrito como é trazido por Hutchings (2016)¹:

- A força de atrito que atua entre duas superfícies deslizantes é proporcional à carga pressionando as superfícies uma contra a outra (ou

¹ Texto original: “The force of friction acting between two sliding surfaces is proportional to the load pressing the surfaces together (i.e. the forces have a constant ratio, often called the coefficient of friction), and the force of friction is independent of the apparent area of contact between the two surfaces.” (HUTCHINGS, 2016, p. 2)

seja, as forças têm uma relação constante, muitas vezes chamada de coeficiente de atrito);

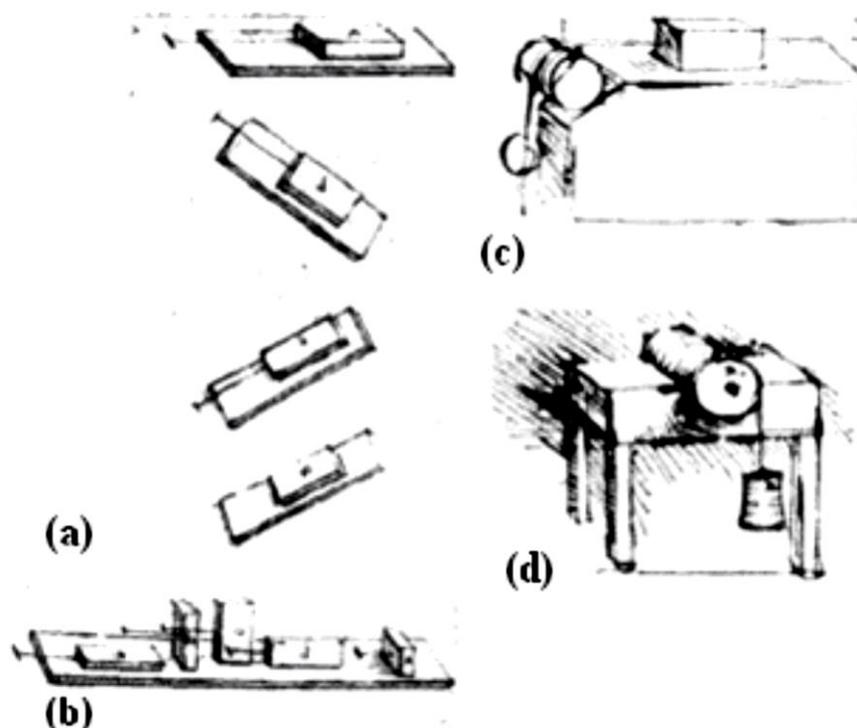
- A força de atrito é independente da área aparente de contato entre o duas superfícies.

Os franceses Guillaume Amontons (1663- 1705) e Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) retomaram esses trabalhos um tempo depois, embora não fossem contemporâneos. Estabeleceu-se uma clara distinção entre os atritos estático e cinético, tendo sido obtido para este último o seguinte resultado empírico adicional:

- A independência da força de atrito cinético à velocidade relativa entre os corpos.

Na Figura 1 é possível notar a confecção de tribômetros, desenvolvidos por da Vinci, os quais tinham o intuito de mensurar a força de atrito: (a) em superfícies horizontais e inclinadas; (b) considerando o efeito da área aparente; (c) utilizando uma polia; e (d) considerando o torque num cilindro.

Figura 1 – Tribômetros de da Vinci

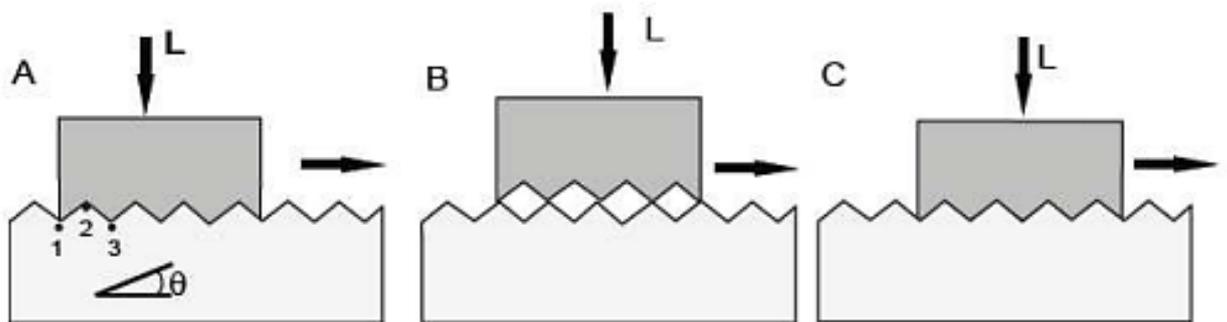


Fonte: Radi *et al.* (2007).

Naquela época, em meados do Século XVIII, a origem do atrito era consensualmente atribuída à rugosidade das superfícies, isso consolidado mediante uma explicação que propunha um modelo microscópico de encaixes e desencaixes. Essa relação é conhecida como lei de Amontons-Coulomb, onde a intensidade da força de atrito é proporcional à força compressiva.

Em 1750, o Matemático e teólogo suíço Leonhard Euler (1707- 1783) sugeriu que o atrito é causado por um efeito de catraca e que o trabalho de fricção é o mesmo para levantar um corpo sobre as asperezas de outro. Elas teriam uma inclinação igual ou menor que o ângulo crítico de atrito. Assim foi desenvolvida a primeira abordagem claramente analítica do atrito e tratou-a como parte integrante da mecânica dos corpos em movimento. (BASSE, 1992)²

Figura 2 – Modelo idealizado por Euler



Fonte: Basse (1992).

Em estudos mais recentes foram descobertas informações que se opõem às primeiras concepções do atrito, em superfícies ásperas ou rugosas. Por exemplo, onde as irregularidades microscópicas podem se encaixar ou enganchar, a área de superfície efetiva pode ser maior do que a aparente, o que pode aumentar a resistência ao deslizamento. Além disso, em algumas condições, como o uso da lubrificação, aumentando a área de superfície de contato, essa técnica pode

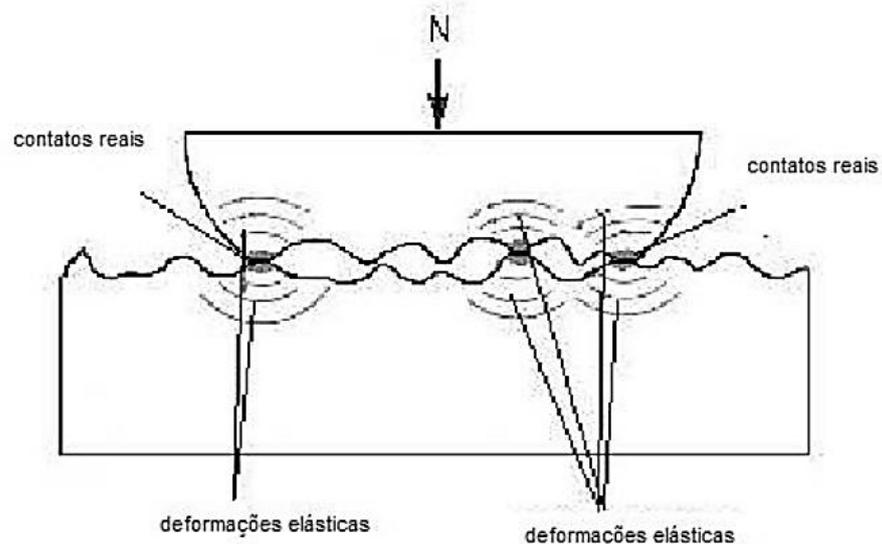
² Texto original: [...] he suggested that friction is caused by a ratcheting effect and that the friction work is the work to lift one body over the asperities of the other. The asperities would have a slope equal to or less than the friction angle. Euler developed the first clearly analytical approach to friction and treated it as an integral part of the mechanics of bodies in motion. (BASSE, 1992, p.24)

desempenhar um papel significativo na redução do atrito. Dessa forma, outra perspectiva é analisada tendo em vista a influência da área da superfície em contato:

No século XX em 1950, Bowden e Tabor elaboraram um modelo que explica o atrito pela adesão entre as superfícies de contato. Neste modelo o atrito é proporcional à área real de contato. A razão entre a força de atrito e a área real de contato (A_R) é conhecida como coeficiente de resistência ao esforço transversal (σ): $F_A = A_R \cdot \sigma$. Segundo este modelo a energia perdida no atrito (estático ou cinético) em escala micrométrica é descrita como uma deformação plástica da região áspera, assumindo assim que o atrito é de origem eletromagnética. (SILVEIRA JÚNIOR; TEDESCO; QUEIROZ, 2005, p. 1)

Acerca do modelo proposto por Bowden e Tabor (*apud* NEIDE, 2007) nota-se que, apesar do atrito pareça ser desvinculado da área de contato aparente, ele está, na verdade, diretamente relacionado à área de contato real. Além disso, constatou-se que esta última não é afetada pelo tamanho da superfície, mas é diretamente proporcional à força normal aplicada. Portanto, quando a carga (força normal) é ajustada, os pontos de contato se adaptam, alterando a área de contato para acomodar a nova carga, como é esquematizado na Figura 3:

Figura 3 – Modelo de Bowden e Tabor



Fonte: Neide (2007).

Nas minúsculas áreas onde acontece o contato real, surgem forças de natureza eletromagnética criando uma certa aderência que unem pequenas partes das superfícies. Quando uma superfície é movida relativamente sobre a outra, ocorrem repetidas “soldas”, que consistem em um processo de ruptura e deslizamento, formando o que é conhecido como o fenômeno "stick-slip" (gruda-escorrega), gerando assim a força de atrito. (MONTEIRO; GASPAR; MONTEIRO, 2012)

Um dos modelos elaborados para explicar a fricção entre as superfícies é publicado em 1929 por Tomlinson: o atrito vem de microescalas. Conforme Neide (2011, p.31) abrange em seus estudos que “átomos que estão muito próximos de uma superfície entram em movimento (vibrante) pela ação deslizante dos átomos da superfície oposta. Estas vibrações quantizadas são chamadas de fônons³, ou ondas acústicas.” Existem diversos locais de contato nos quais os átomos aparentam estar aderidos uns aos outros. Assim, quando se aplica uma força ao corpo deslizante, os átomos se separam e isso gera uma vibração.

2.2 O COEFICIENTE DE ATRITO ESTÁTICO E MÉTODOS PARA DETERMINÁ-LO

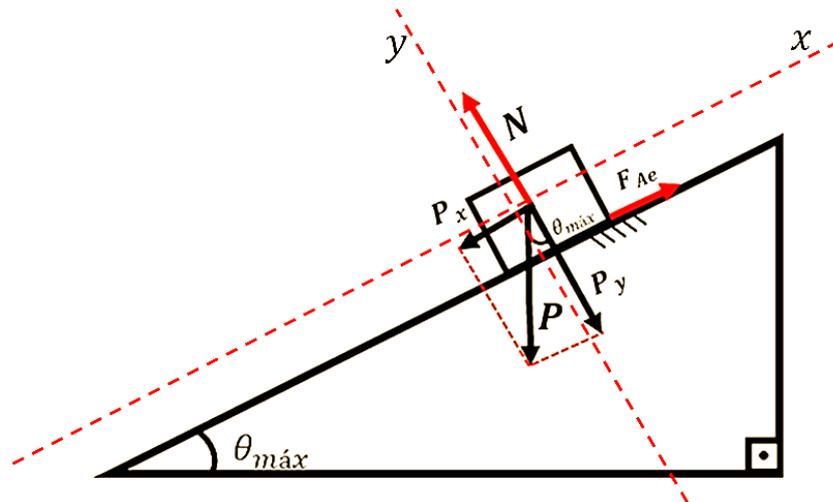
No diagrama de corpo livre como na Figura 4, é feita uma representação gráfica que ilustra as direções e sentidos dos vetores força atuando em um bloco estático na iminência de deslizar.

Nesta figura consideramos o eixo das abcissas x paralelo à superfície de contato, enquanto que o das ordenadas y é perpendicular à mesma. Frequentemente utilizado para analisar sistemas onde a gravidade influencia o movimento de um objeto ao longo de uma superfície inclinada. Logo podemos notar que as condições de equilíbrios estático devem ser obedecidas:

³ A palavra "fonon" é derivada de "phone", que significa som ou voz em grego. Connor (2019) explica que “um fonon é uma excitação coletiva em um arranjo elástico periódico de átomos ou moléculas na matéria condensada”.

Disponível em: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-phonon-definicao/>

Figura 4 – Diagrama de forças atuantes num corpo sobre um plano inclinado na iminência de deslizar.



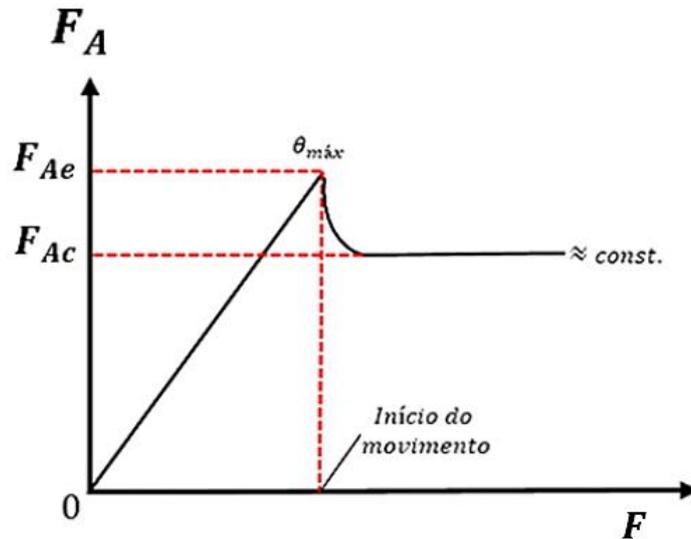
Fonte: Autoria própria (2023).

No livro de Nussenzveig (2013) é apresentado uma análise para o coeficiente de atrito estático μ_e , entre um objeto que se encontra sobre a superfície de um plano inclinado, explorando a conexão fundamental entre a fricção desse objeto prestes a escorregar e sua representação adimensional por meio de uma função trigonométrica, a tangente do ângulo máximo antes do deslizamento. Fazendo uma mescla com a proposta anterior, Tipler e Mosca (2009) trazem em sua obra um exemplo acessível para tal fenômeno, ele consiste numa moeda disposta a deslizar na capa de um livro que é aberto lentamente.

Para quantificar o atrito entre a interação de dois corpos é utilizado o coeficiente de atrito, que não dispõe de unidade de medida. Ele descreve a razão entre a força de atrito e a força normal (a força perpendicular à superfície). Quanto maior a irregularidade das faces em contato maiores tendem a ser seus coeficientes de atrito, os quais podem ser estáticos (em repouso) ou cinéticos (em movimento).

Conforme é observado no Gráfico 1, o esboço mostrando que a intensidade da força de atrito cinético que age nos corpos uma vez que se encontram em movimento é menor que a força máxima de atrito sobre corpos em repouso, a medida que uma força é aplicada sobre eles. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009)

Gráfico 1 – Módulo das forças de atrito estático e cinético



Fonte: Autoria própria (2023).

Para a experimentação desenvolvida no trabalho é enfatizado que a força de atrito estático no plano ajustável é máxima para o ângulo em que o objeto começa a deslizar ($\theta_{m\acute{a}x}$). Logo, o movimento é iniciado e não se varia a angulação.

Sabemos que a magnitude da força de atrito (F_A) atuante nesse corpo corresponde ao produto do coeficiente de atrito (μ), este último é sempre um valor numérico menor, pela força Normal de contato (N), vista em (1):

$$F_A = \mu N, \text{ onde } \mu_e > \mu_c \quad (1)$$

A força gravitacional, também denominada Peso (P), equivalente ao produto da massa (m) pela aceleração da gravidade (g), tem uma de suas componentes atuando no sentido do deslizamento e tangencial ao plano (P_x), assim descrita (2); da mesma forma, a componente do Peso que age no sentido oposto à Normal (P_y), pode se designada por (3):

$$P_x = P \sen \theta = mg \sen \theta \quad (2)$$

$$P_y = P \cos \theta = mg \cos \theta = N \quad (3)$$

O ângulo máximo de inclinação, também conhecido como ângulo de repouso ($\theta_{m\acute{a}x}$), é a medida angular limite na qual um objeto está propenso a deslizar, para valores inferiores ou iguais a este, o corpo atende ao conceito de equilíbrio estático onde a resultante das forças que atuam sobre o corpo é nula, ele encontra-se em repouso para o referencial que neste caso é o plano ajustável para ambos os eixos (4), observa-se também que essas forças possuem uma relação (5):

$$\sum \vec{F} = 0, \text{ assim } \vec{F}_x = \vec{F}_{\parallel} = 0; \vec{F}_y = \vec{F}_{\perp} = 0 \quad (4)$$

$$(P_x - F_{Ae})\hat{x} = 0; (P_x - N)\hat{y} = 0 \quad (5)$$

Agora é possível igualar a componente P_x , que causaria o deslizamento, com a força de atrito estático (F_{Ae}), resistiva ao movimento, como vemos na igualdade abaixo (6); sendo esta proporcional às grandezas já referidas μ_e e a N , onde essa relação pode ser utilizada apenas quando F_{Ae} tem seu valor máximo. Com a angulação máxima obtemos também (7):

$$F_{Ae} = P_x, \text{ onde } F_{Ae \text{ máx}} = \mu_e N \quad (6)$$

$$P \text{ sen } \theta_{m\acute{a}x} = \mu_e N \quad (7)$$

Algebricamente, substitui-se o valores fornecidos que correspondem a N , contendo P nos dois lados da igualdade, a expressão passa a ser (8):

$$P \text{ sen } \theta_{m\acute{a}x} = \mu_e P \text{ cos } \theta_{m\acute{a}x} \quad (8)$$

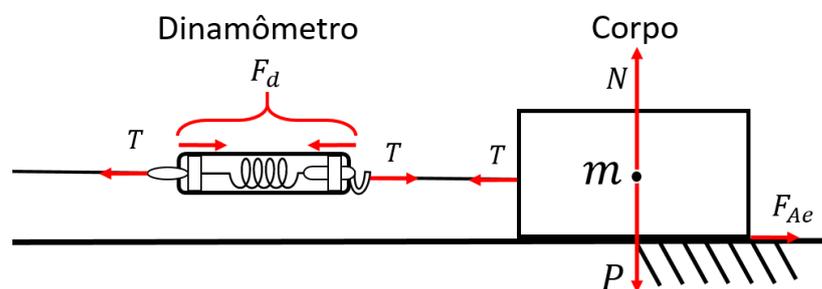
Por último, simplificando a expressão (8) com o cancelamento dos fatores P , isola-se μ_e em um lado da equação, temos uma razão entre as funções seno e cosseno, agora temos uma identidade trigonométrica fundamental, que corresponde a função tangente (9), que por sua vez depende do ângulo máximo de inclinação, aquele cujo corpo está prestes a romper o atrito que impede o movimento:

$$\mu_e = \frac{\text{sen } \theta_{m\acute{a}x}}{\text{cos } \theta_{m\acute{a}x}} = \text{tg } \theta_{m\acute{a}x} \quad (9)$$

A expressão anterior será utilizada como referência neste trabalho para determinar alguns coeficientes de atrito estáticos máximos. Não é muito apropriado se embasar em valores de coeficientes de atrito encontrados em tabelas. Como caracteriza Ludema (1996)⁴, o coeficiente de atrito não é uma propriedade intrínseca de um material ou combinações de materiais. Em vez disso, varia com mudanças na umidade, pressão do gás, temperatura, velocidade de deslizamento e pressão de contato. É diferente para cada lubrificante, para cada qualidade de superfície e para cada formato da região de contato. Em nosso experimento propomos medir coeficientes de atrito entre superfícies usando o ângulo máximo de equilíbrio estático entre elas.

Outra forma de descobrir essa grandeza adimensional é utilizando um dinamômetro como representado na Figura 5. A força elástica da mola do dinamômetro F_d é igual à tensão T que puxa o corpo, também igual à força de atrito estática F_{Ae} , pois são iguais em módulo. Todas as forças vão aumentando na medida em que aumenta a tração aplicada ao dinamômetro pelo experimentador. Na iminência do deslizamento a força de atrito estática máxima é exatamente igual à força marcada no dinamômetro.

Figura 5 – Diagrama de forças atuantes num sistema corpo-dinamômetro sobre uma superfície horizontal submetida a uma força de tração horizontal



Fonte: Autoria própria (2023).

⁴ Texto original: "The coefficient of friction is not an intrinsic property of a material or combinations of materials. Rather it varies with changes in humidity, gas pressure, temperature, sliding speed, and contact pressure. It is different for each lubricant, for each surface quality, and for each shape of contact region." (LUDEMA, 1996, p.110)

Deste modo, uma relação entre os valores aferidos nas marcações do dinamômetro, a qual chamaremos de F_d , ao coeficiente de atrito estático, é explicada pela seguinte equação:

$$F_d = T = F_{Ae\ máx} = \mu_e N \therefore \mu_e = \frac{F_d}{mg} \quad (10)$$

Nestas duas situações, os valores medidos de coeficientes de atrito estáticos devem ter valores próximos entre si. Em nosso experimento preferimos comparar medidas feitas em ambas as configurações, ou seja, plano inclinado e dinamômetro, em vez de usar como referência valores tabelados.

A Tabela 1 expõe os intervalos dos valores que μ_e pode assumir em relação ao plano inclinado, válida para a expressão desenvolvida em (9):

Tabela 1 – Intervalo dos valores que μ_e pode assumir de acordo com a angulação da rampa

Ângulo de inclinação do plano (Coeficiente de atrito estático (θ)°)	Coeficiente de atrito estático (μ_e)
$0^\circ < \theta < 45^\circ$]0,1[
$\theta = 45^\circ$	1
$\theta < 45^\circ$	Maior que 1

Fonte: Elaborada pelo Autor (2023).

Objetos que permanecerem estacionários em ângulos acima de 45° possuem o $\mu_{emáx}$ superior a um. Nesta situação seria necessário um esforço maior para arrastar o objeto do que para levantá-lo.

Na página oficial do Centro de Referência para Ensino de Física – CREF podemos acompanhar um debate interessante num fórum de discussões sobre uma opinião comum de alguns estudantes de que o coeficiente de atrito não deveria ser

maior do que 1. O professor Medeiros (2016) ⁵ relata o seguinte diálogo com um estudante:

- “Professor, o senhor já disse que o COEFICIENTE de ATRITO pode ser MAIOR que UM; mas isso não leva a uma CONTRADIÇÃO?”

Eu olho para ele e devolvo a pergunta:

- Que CONTRADIÇÃO?

- “Porque, para mim, se o COEFICIENTE de ATRITO puder ser maior do que UM, então a FORÇA de ATRITO poderia ser MAIOR do que a FORÇA MOTORA APLICADA ao CORPO e assim se ele estivesse, por exemplo, em REPOUSO sobre uma superfície PLANA; quando eu o EMPURRASSE, ele se MOVERIA na minha DIREÇÃO, o que me parece uma DOIDICE”.

Neste diálogo fica evidente que o estudante confunde a força de atrito com uma força motora, em vez de assumi-la como uma força de reação. Quando empurramos ou puxamos um corpo rígido em cima de uma superfície, as interações eletromagnéticas e mecânicas entre as superfícies vão reagir se opondo ao movimento, a força de reação sempre será igual à força da ação sobre o corpo.

⁵ Disponível em: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=o-valor-do-coeficiente-de-atrito-pode-ser-maior-do-que-um>

3 ENSINO EXPERIMENTAL

O ensino experimental desempenha um papel crucial na promoção da aprendizagem científica, pois oferece benefícios que incluem desde as metodologias ativas, até o desenvolvimento de habilidades práticas. Um aspecto fundamental das atividades experimentais é a construção do conhecimento por meio das experiências diretas.

Ilustrar conceitos da disciplina de Física, através de experiências para que os alunos percebam a importância desses estudos, o que se pensava a respeito antes daquela descoberta, as implicações que esses novos conhecimentos trouxeram, e um pouco do que eles representam para a sociedade.

Compreende-se, então, como as atividades experimentais são enriquecedoras para o aluno, uma vez que elas dão um verdadeiro sentido ao mundo abstrato e formal das linguagens. Elas permitem o controle do meio ambiente, a autonomia face aos objetos técnicos, ensinam as técnicas de investigação, possibilitam um olhar crítico sobre os resultados. Assim, o aluno é preparado para poder tomar decisões na investigação e na discussão dos resultados. O aluno só conseguirá questionar o mundo, manipular os modelos e desenvolver os métodos se ele mesmo entrar nessa dinâmica de decisão, de escolha, de inter-relação entre a teoria e o experimento.

(SERÊ; COELHO; NUNES, 2003, p. 39).

Esse formato constitui uma aula mais tangível onde os alunos aprendem vendo exemplos reais e não apenas idealizados com situações difíceis de se verificar na escola, assim essa prática facilita o entendimento dos alunos sobre qual o objetivo de estudar determinado assunto.

A realização de experimentos práticos desempenha um papel fundamental no ensino de Física, pois permite a construção ativa do conhecimento, conforme é descrito no texto de Bonadiman e Nonenmacher (2007, p. 202), “A experimentação como um contexto importante na obtenção de informações (observações e medidas) e na produção de ideias que constituem uma das bases de apoio no processo de formação do saber.”

Deve-se enfatizar a importância de documentar cuidadosamente todos os procedimentos experimentais, incluindo os cálculos de erro, para que em práticas

futuras possam se replicar os resultados ou ajustar os métodos de acordo com suas necessidades específicas.

Um experimento simples pode ser utilizado para comprovar as propriedades do coeficiente de atrito estático. Mas deve-se tomar extremo cuidado na análise dos dados experimentais, levando-se em consideração os erros (ou incertezas) de medida, erros aleatórios e os erros propagados, para obtermos resultados coerentes com os propostos nos livros didáticos. Deve-se tomar cuidado com as condições iniciais do experimento e também com a reprodutibilidade dos dados experimentais. (MATUO; MARINELLI, 2007, p. 138-139).

A realização de estudos sobre atrito geralmente acontece em ambientes laboratoriais cujos equipamentos são, além de sofisticados, específicos para cada procedimento. O acesso a essas tecnologias é bem limitado e isso torna desafiadora a aprendizagem prática de alguns conceitos da física como o atrito. Surge então uma alternativa que consegue desempenhar um papel na aquisição de informações, dados e amostras: os programas computacionais de análise de vídeo e os aparelhos celulares.

4 METODOLOGIA

Acerca dos procedimentos necessários para a confecção do experimento, neste capítulo são descritas informações a respeito da proposta do modelo tribométrico. A pesquisa sobre o atrito é um delineamento experimental, pois investiga cientificamente a relação entre um agente físico a partir da manipulação de variáveis ligadas a força de atrito estático. A mesma tem natureza de cunho exploratório, na qual cada um dos objetivos traçados estão sob alcance de discussões e levantamentos efetuados.

A pesquisa em questão reúne elementos do tipo experimental pelo caráter examinador, com o intuito de determinar previsões utilizando leis gerais da ciência de forma a combiná-las com uma situação inicial, em outros termos, ela analisacircunstâncias particulares, acompanhando os fatos que precisam ser explicados (ALVES-MAZZOTTI; GEWANDSZNAJDER, 1998).

Com uma estratégia mais analítica de desenvolver as equações que compreendem o diagrama de forças atuantes no corpo estudado, é necessário promover sucessivos testes até a calibração, para garantir minimamente a eficiência do experimento. Em suma, pode-se afirmar que uma pesquisa de caráter experimental “consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.” (GIL, 2002, p. 47).

A princípio, num estudo inicial, os blocos seriam soltos de dois modos: no primeiro caso esses objetos são colocados em pequenas angulações que variam até deslizarem, no segundo em ângulos próximos ao máximo, mas não superiores. Logo seria identificado alguma relação ou não com propriedades inerciais, sua própria tendência natural de permanecer em movimento ou repouso.

Entretanto, um novo objetivo foi idealizado: uma aplicação experimental de duas situações que foram analisadas referentes a força de atrito estático num plano horizontal, sucedida da mesma grandeza atuando num plano inclinado. É importante frisar que um dos blocos possui o mesmo material da superfície do plano (uma madeira laminada de fórmica), enquanto os outros são feitos a partir de gesso e de metal, porém neste último o lado deslizante é uma camada de borracha. Neste

capítulo, é descrita toda montagem, descrição dos materiais utilizados e manutenção do modelo até a prática experimental em si.

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Como todo experimento, é necessária a utilização efetiva ou parcial de alguns materiais, além do local onde é feita a coleta dos dados para que a investigação permita a observação, medição e controle de certas variáveis relevantes à pesquisa em questão.

Esses procedimentos concentraram-se em ambiente fechado sob uma bancada plana e imóvel, sem interferência de forças externas, cujos materiais que tiveram seu uso efetivo consistem em:

- Tábuas de madeira;
- Dobradiças simples;
- Cantoneiras (mão-francesa);
- Tábua de MDF laminada de fórmica;
- Gancho rosqueável;
- Fita adesiva isolante;
- Barbante de algodão (2 mm);
- Polia fixa;
- Interruptor + Cabo c/ plugue;
- Motor de forno micro-ondas;
- Microscópio portátil;
- Réguas (30 cm e 40 cm);
- Dinamômetro;
- Arco de Serra;
- Câmera Smartphone + Haste para gravação (tripé);
- Grampo tipo C;
- Lixa grão 360;
- Bloco de madeira revestida de fórmica (12×5×1) cm;
- Bloco de gesso (8×3×1) cm;
- Bloco metálico de face emborrachada (6×3×2) cm.

Vale ressaltar algumas observações a respeito dos instrumentos de medição utilizados. Eles são delicados e para manuseá-los de maneira adequada foi necessário cautela, inspecionando sempre sua condição física para não o danificar e minimizar algumas, mas não todas fontes de erro, pois:

O grau de sofisticação e/ou de precisão do aparelho utilizado não livra o operador da existência de erros ao realizar a medida. Por essa razão, os dados experimentais devem ser acompanhados de um posterior tratamento matemático que permita uma avaliação da confiabilidade dos resultados obtidos, isto é, o quanto eles estão corretos, são aceitáveis ou mesmo infundados. (PIACENTINI *et al.* 2001, p. 21)

4.2 ARRANJO EXPERIMENTAL

A escolha feita para abordar a pesquisa desenvolvida e responder as perguntas-chaves está diretamente ligada ao arranjo experimental e como seria replicá-lo num modelo tribométrico. A fim de construir esse instrumento de ensino experimental, foi necessária uma etapa complementar entre a montagem e a manutenção, assim ocorreu a calibração do experimento para evitar fontes de erro indesejáveis e garantir uma certa eficácia nos resultados.

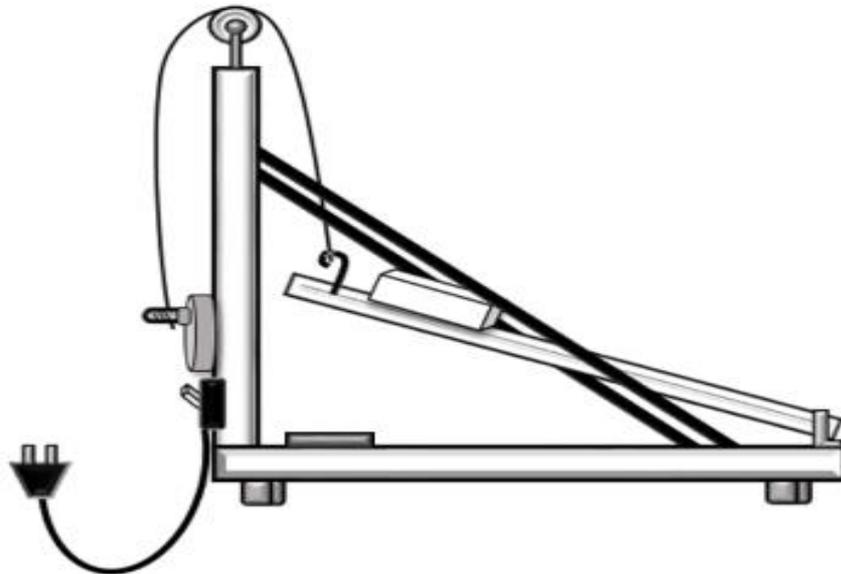
Na montagem, tendo em vista os materiais que constam no tópico anterior, o primeiro passo está no encaixe das duas tábuas de madeira num formato perpendicular, fixadas por cavilhas, na tábua maior que fica na horizontal, são distribuídos os mini pés plásticos nas proximidades dos vértices da face inferior. Para manter uma base firme é feito um reforço ainda maior com os suportes de cantoneiras (mão-francesa), ligados entre elas.

A terceira tábua, cuja superfície é a rampa de deslizamento (laminada de fórmica), tem a função de plano inclinado, a qual pode ser ajustável graças às dobradiças simples e uma linha de barbante presa ao mesmo por um gancho rosqueável. A linha passa por uma polia fixa e se liga a um motor elétrico de forno micro-ondas, que o envolve gradativamente (na ordem de mm) à medida que ele rotaciona o plano começa a se inclinar. Esse motor estabelece uma conexão com a rede elétrica ao ser ligado à tomada.

O motor de micro-ondas (receptor elétrico) possui um eixo com diâmetro de 7,0 mm que rotaciona numa frequência de 3 r/min, envolvendo a linha amarrada ao plano inclinável, operando a uma tensão elétrica de 220 V. Nos seus terminais é associado um interruptor que serve para desligá-lo instantaneamente após o movimento dos objetos.

Dessa forma, são coladas régua de 30 cm e 40 cm, na faixa lateral do experimento, as quais serviram de comparativo nas amostras de vídeo. O modelo tomaria determinadas proporções que permitiriam desde teste com o plano inclinado, até completamente horizontal, projetado de acordo com a Figura 6:

Figura 6 – Modelo experimental do plano inclinável motorizado



Fonte: Autoria própria (2023).

A calibração do experimento é feita em ambiente laboratorial, pois deve se concentrar em local fechado numa bancada plana e sem trepidações, utilizando um nível para garantir que não haja inclinação na base do plano. O nível também é posto sobre a bancada para garantir as mesmas condições.

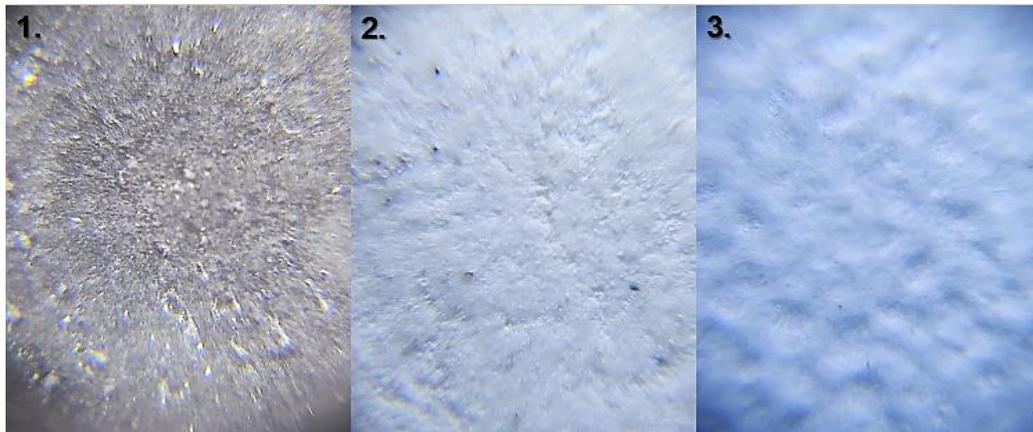
Nas cantoneiras é amarrada uma linha que se adapta à altura dos blocos, única e exclusivamente para posicionar o dinamômetro, para que este fique sob mesmos níveis dos blocos.

Com ajuda de um microscópio compacto, o qual se conecta à câmera do *smartphone*, foi possível fazer registros fotográficos aproximados. A imagem das faces que ficaram em contato com o plano é aumentada em 60 vezes com o ajuste do

foco, segundo rótulo do aparelho, logo é possível observar numa pequena área nitidamente, como mostra a Figura 7 abaixo, as asperezas ou rugosidades dos seguinte materiais:

1. Borracha;
2. Gesso;
3. Fórmica.

Figura 7 – Faces deslizantes ampliada em 60x



Fonte: Autoria própria (2023).

Tais imagens são importantes para uma melhor compreensão do que engloba este fenômeno que é o atrito. As interações que ocorrem em escalas microscópicas quando objetos são friccionados são influenciadas pelo quão irregulares forem as camadas externas em contato desses objetos.

4.3 SOFTWARE TRACKER

Conforme descrito por Brown (2018), o *software Tracker* representa uma ferramenta de análise e modelagem de vídeos, fundada na estrutura *Java* da *Open Source Physics (OSP)*, que se destina ao contexto do ensino da física. Este aplicativo possibilita a vinculação de atributos que exploram os fenômenos da mecânica, incluindo a habilidade de associar eixos de coordenadas de posição, os quais podem

ser usados para extrair informações relacionadas à velocidade e à aceleração, tanto em deslocamentos lineares quanto angulares.

O programa possui uma interface simples e de fácil assimilação das funções, assim:

A inteligibilidade do software, aliada a uma câmera de celular, possibilitam a construção de um roteiro experimental que ordena passos na elaboração da prática, ao mesmo tempo que procura posicionar a construção de conhecimento (ALVES; FERREIRA; FILHO, 2019, p. 24)

Tal programa de videoanálise pode realizar medições precisas de comprimento, angulação e outras variáveis, contribuindo para resultados obtidos, além de uma visualização clara do fenômeno em tese, permitindo capturar e analisar gravações imediatamente após experimentação.

O experimento após ser filmado por uma câmera de celular, foi direcionado ao *Tracker*. A gravação feita em 1080 p e 30 FPS permite uma maior nitidez para exercer as medidas com as ferramentas do programa.

Para o caso dos blocos no plano inclinado, o auxílio das ferramentas virtuais “transferidor” e “eixos” torna possível determinar o ângulo da rampa detectando uma posição para centralizá-lo, traçando uma reta sobreposta ao eixo das abcixas, paralela à base horizontal do modelo, e outra com a mesma inclinação do plano móvel, esta é ligada a um ponto sobre o eixo das ordenadas.

Agora, é necessário medir o comprimento dessas retas, processo que é simples uma vez que a régua grudada ao experimento funciona como um padrão seguido através da ferramenta “bastão de calibração”, e sucedida pela opção “fita métrica”, uma espécie de paquímetro digital, a qual mede os comprimentos nos eixos x da reta e y do ponto extremo da linha tracejada, respectivamente, formando um triângulo retângulo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após repetidos testes, foi dado início às gravações do experimento, utilizando uma haste como suporte para posicionar adequadamente a câmera do aparelho celular, numa posição que favoreça a captura ampla do experimento, como também a régua que será um parâmetro para as medidas no *Tracker*. Com o programa permitindo a contagem de três algarismos significativos nos decimais, será arredondado os valores encontrados para a função tangente com os mesmos critérios.

Outro fator importante é que o bloco de gesso por se desgastar facilmente será analisado por último. Devido ao desgaste de sua face deslizante e sua textura porosa, na etapa de teste quando o bloco de gesso escorregava primeiro, os demais blocos tinham uma diminuição considerável na sua angulação devido as partículas de gesso que se soltavam do bloco, estes resíduos tornavam a superfície do plano menos áspera, semelhante a uma lubrificação, só que com sólidos ao invés de líquidos.

O modelo experimental conseguiu desempenhar uma ótima reprodutibilidade pois o uso da videoanálise permitiu visualizar com detalhes as condições exatas do experimento e como as medições foram feitas, além das repetições sem grandes inconcistências nos dados coletados. Foram efetuadas 10 medições para cada caso abordado nos diferentes blocos, medidas que mais a frente são computadas e comparadas entre si.

Destaca-se também o uso de equipamentos digitais como a balança de precisão cuja incerteza associada ao erro de escala é o menor dígito da medida, enquanto nos instrumentos analógicos a exemplo de réguas e do próprio dinamômetro, é considerado a metade da menor marcação.

Tabela 2 – Massa dos blocos

Material da face que desliza pela rampa	Massa e sua incerteza ($m \pm \Delta m$) g
Borracha	190,03 \pm 0,01
Fórmica	120,47 \pm 0,01
Gesso	70,39 \pm 0,01

Fonte: Elaborada pelo Autor (2023).

Seria fácil determinar os valores da função tangente utilizando uma calculadora científica desde que se tenha o ângulo do plano inclinado com a horizontal, contudo para verificar a precisão do *Tracker*, é utilizado uma razão trigonométrica básica com os catetos, oposto (l_1) e adjacente (l_2) ao ângulo de inclinação, nos instantes em que os corpos estão prestes a deslizar. Como é mostrado na relação abaixo (10):

$$\mu_e = \tan \theta_{m\acute{a}x} = \frac{l_1}{l_2} \quad (10)$$

De acordo com o livro de Piacentini *et al.* (2001), ótica referência para ensino experimental, a incerteza propagada no cálculo do coeficiente de atrito estático refere-se às equações (11) e (12), que correspondem à superfície horizontal (I) e ao plano inclinado (II), primeiro e segundo casos respectivamente, estando relacionados à propagação de erro dos instrumentos de medição. Elas consistem no somatório dos n-ésimos termos dos produtos entre incertezas e módulos de derivadas parciais para cada grandeza proporcional ao μ_e (13):

$$\Delta\mu_e = \left| \frac{1}{mg} \right| \Delta F_d + \left| -\frac{F_d}{mg^2} \right| \Delta g + \left| -\frac{F_d}{m^2 g} \right| \Delta m \quad (11)$$

$$\Delta\mu_e = \left| \frac{1}{l_2} \right| \Delta l_1 + \left| -\frac{l_1}{l_2^2} \right| \Delta l_2 \quad (12)$$

$$\Delta y = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| \Delta x_n \quad (13)$$

Para o uso efetivo nas equações acima, a aceleração da gravidade g adotada neste trabalho é o valor-padrão de aproximadamente $9,80665 \text{ m/s}^2$ (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009). Após a extração dos coeficientes, é utilizado recursos da estatísticas que auxiliaram a interpretar o conjunto de dados, A média aritmética e o desvio padrão da amostra (14):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (14)$$

Outra checagem que será exposta nas conclusões deste trabalho, fala sobre a diferença percentual, e mostra a porcentagem de discrepância entre os valores utilizados para μ_e (15), tendo como valores nominais a média dos coeficientes de atrito estático encontrados no plano inclinado ($\overline{\mu_{e1}}$) pela média coeficientes de atrito estático medidos na superfície horizontal ($\overline{\mu_{e2}}$):

$$\mu_e \% = \left| \frac{\mu_{e1} - \mu_{e2}}{\mu_{e2}} \right| \cdot 100\% \quad (15)$$

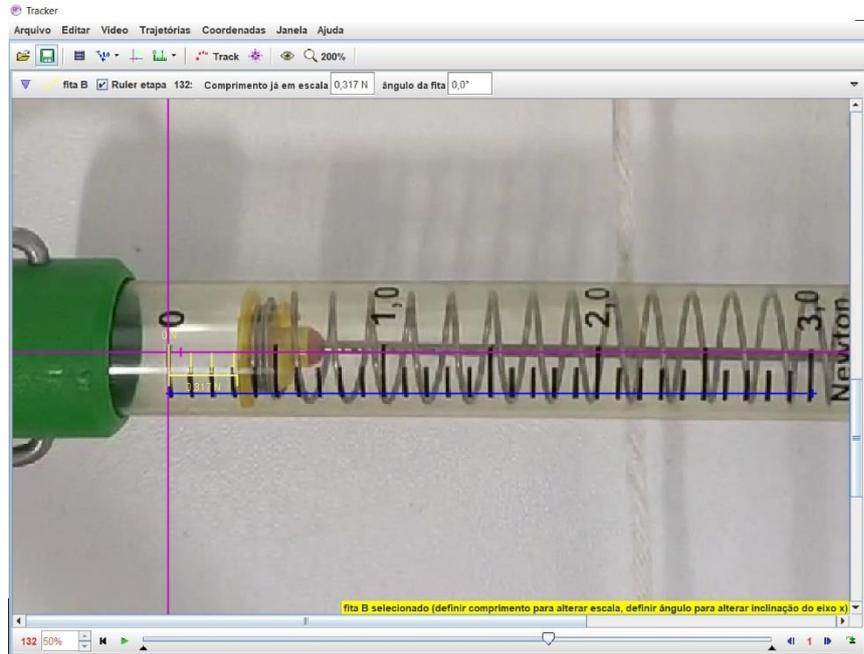
5.1 BLOCO DE FÓRMICA

A escolha da fórmica está diretamente ligada ao fato de que a rampa é feita de um idêntico. Trata-se de um material versátil amplamente utilizado para revestir superfícies prensado em alta pressão, especialmente em móveis, balcões, pisos, etc. Foi retirado um pedaço da própria tábua antes de acoplá-la à base do experimento, logo as irregularidades da face que escorrega na rampa têm muita semelhança com a superfície da mesma.

Outro detalhe que é válido ressaltar sobre a área de contato desse corpo ser maior que as dos demais, em parte da fundamentação teórica é discutido a relação de dependência entre a real área de contato com a força de atrito. Para tracionar o bloco de fórmica foi colocado um pequeno pedaço de linha e uma fita adesiva para que se prendesse ao dinamômetro, os quais foram pesados juntos. Abaixo, as figuras 8 e 9 demonstram a interface do *Tracker*, enquanto que nas tabelas 3 e 4 são anotados os valores das grandezas importantes para esse estudo.

I. Plano Horizontal

Figura 8 – Captura do *Tracker* (dinamômetro arrastando o bloco de fôrmica)



Fonte: Autoria própria (2023).

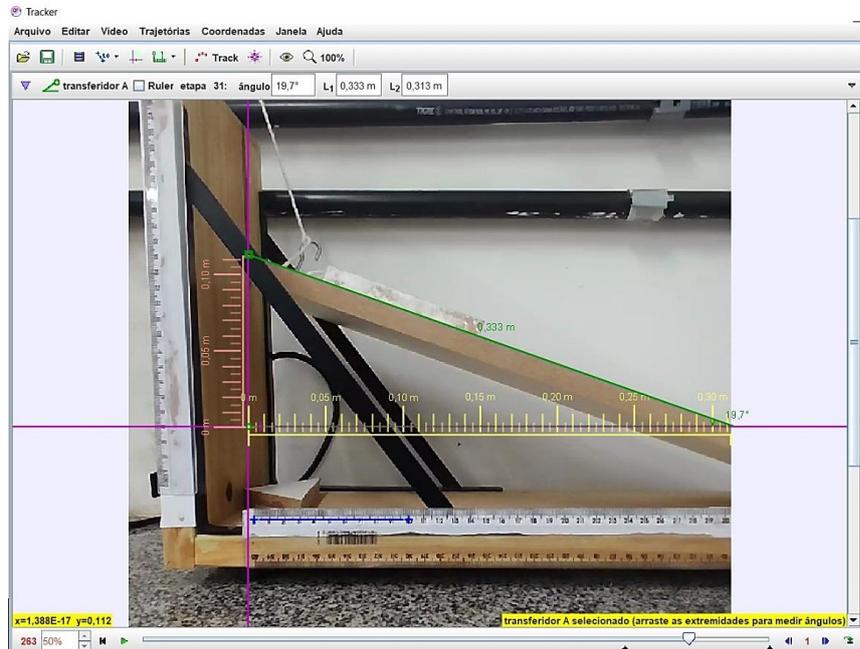
Tabela 3 – Medidas do atrito estático (dinamômetro arrastando o bloco de fôrmica)

Tração no dinamômetro (Força de atrito estático) $(F_d \pm \Delta F_d)$ N	Coefficiente de atrito estático $(\mu_e \pm \Delta \mu_e)$
$0,31 \pm 0,01$	$0,262 \pm 0,009$
$0,29 \pm 0,01$	$0,245 \pm 0,009$
$0,33 \pm 0,01$	$0,279 \pm 0,009$
$0,35 \pm 0,01$	$0,296 \pm 0,009$
$0,32 \pm 0,01$	$0,271 \pm 0,009$
$0,31 \pm 0,01$	$0,262 \pm 0,009$
$0,37 \pm 0,01$	$0,314 \pm 0,009$
$0,35 \pm 0,01$	$0,296 \pm 0,009$
$0,29 \pm 0,01$	$0,245 \pm 0,009$
$0,31 \pm 0,01$	$0,262 \pm 0,009$

Fonte: Autoria própria (2023).

II. Plano inclinado

Figura 9 – Captura do *Tracker* (bloco de fórmica sobre plano inclinado)



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 4 – Medidas para o atrito estático (bloco de fórmica no plano inclinado)

Angulação (θ)°	Cateto oposto ($l_1 \pm \Delta l_1$)m	Cateto adjacente ($l_2 \pm \Delta l_2$)m	Coefficiente de atrito estático ($\mu_e \pm \Delta \mu_e$)
19,7	0,11 \pm 0,01	0,31 \pm 0,01	0,35 \pm 0,04
18,5	0,12 \pm 0,01	0,36 \pm 0,01	0,33 \pm 0,04
20,1	0,10 \pm 0,01	0,28 \pm 0,01	0,36 \pm 0,04
17,9	0,11 \pm 0,01	0,34 \pm 0,01	0,32 \pm 0,04
18,8	0,13 \pm 0,01	0,38 \pm 0,01	0,34 \pm 0,04
18,5	0,12 \pm 0,01	0,36 \pm 0,01	0,33 \pm 0,04
17,8	0,15 \pm 0,01	0,47 \pm 0,01	0,32 \pm 0,04
19,1	0,11 \pm 0,01	0,32 \pm 0,01	0,34 \pm 0,04
17,5	0,14 \pm 0,01	0,45 \pm 0,01	0,31 \pm 0,04
16,8	0,11 \pm 0,01	0,38 \pm 0,01	0,29 \pm 0,04

Fonte: Autoria própria (2023)

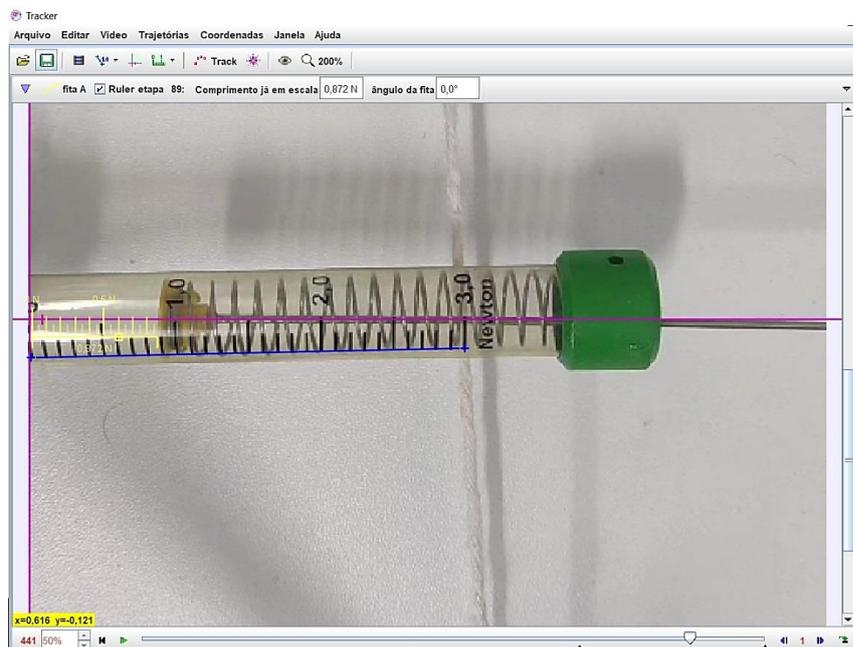
5.2 BLOCO DE METAL E BORRACHA

O bloco metálico com revestimento inferior de borracha foi encontrado em um kit de experimentos, este bloco, por sua vez, serviu com um improviso já que foi difícil encontrar outro completamente de borracha, sabendo que para a indústria automotiva, esse material é sinônimo de muita aderência mesmo com uma superfície bastante lisa tanto a olho nu, como também através do microscópio adaptado.

É inserido um suporte que se interliga ao bloco emborrachado que prende o dinamômetro, outro aspecto a se constatar é que dentre os blocos este é o mais massivo, conseqüentemente mais pesado. Nas figuras 10 e 11 assim como nas tabelas 5 e 6, executa-se os mesmos procedimentos que no bloco acima.

I. Plano Horizontal

Figura 10 – Captura do *Tracker* (dinamômetro arrastando o bloco de metal e borracha)



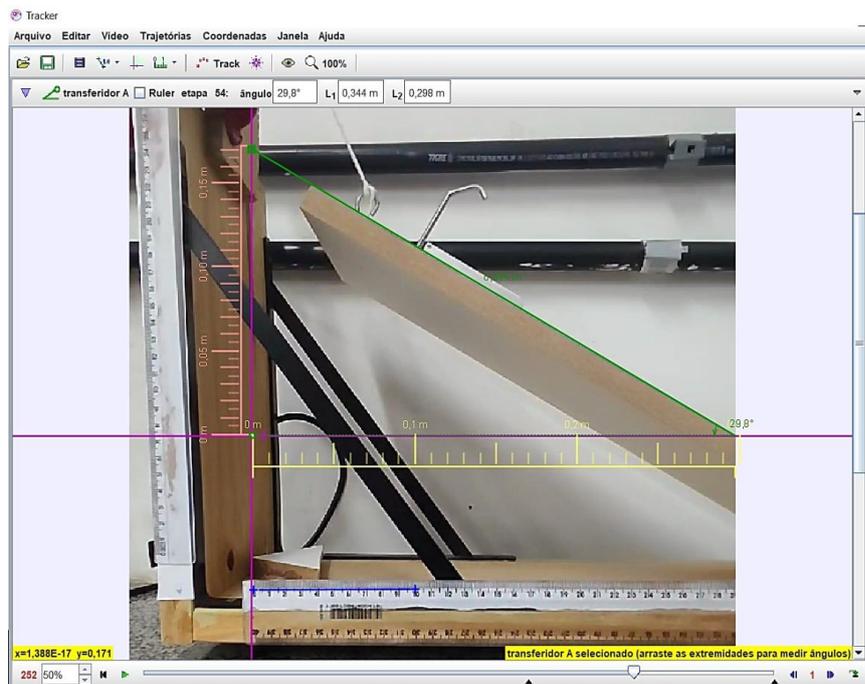
Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 5 – Medidas do atrito estático (dinamômetro arrastando o bloco de metal e borracha)

Tração no dinamômetro (Força de atrito estático) $(F_d \pm \Delta F_d)$ N	Coefficiente de atrito estático $(\mu_e \pm \Delta\mu_e)$
$0,87 \pm 0,01$	$0,467 \pm 0,006$
$0,86 \pm 0,01$	$0,461 \pm 0,006$
$0,84 \pm 0,01$	$0,451 \pm 0,006$
$0,79 \pm 0,01$	$0,424 \pm 0,006$
$0,85 \pm 0,01$	$0,456 \pm 0,006$
$0,91 \pm 0,01$	$0,488 \pm 0,006$
$0,87 \pm 0,01$	$0,467 \pm 0,006$
$0,90 \pm 0,01$	$0,483 \pm 0,006$
$0,83 \pm 0,01$	$0,445 \pm 0,006$
$0,91 \pm 0,01$	$0,488 \pm 0,006$

Fonte: Autoria própria (2023).

II. Plano Inclinado

Figura 11 – Captura do *Tracker* (bloco de metal e borracha sobre plano inclinado)

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 6 – Medidas para o atrito estático (bloco de metal e borracha no plano inclinado)

Angulação (θ)°	Cateto oposto ($l_1 \pm \Delta l_1$)m	Cateto adjacente ($l_2 \pm \Delta l_2$)m	Coefficiente de atrito estático ($\mu_e \pm \Delta \mu_e$)
29,8	0,17 \pm 0,01	0,30 \pm 0,01	0,56 \pm 0,05
29,1	0,18 \pm 0,01	0,33 \pm 0,01	0,55 \pm 0,05
27,1	0,16 \pm 0,01	0,32 \pm 0,01	0,50 \pm 0,05
29,2	0,18 \pm 0,01	0,33 \pm 0,01	0,55 \pm 0,05
28,6	0,19 \pm 0,01	0,35 \pm 0,01	0,54 \pm 0,05
27,7	0,15 \pm 0,01	0,29 \pm 0,01	0,52 \pm 0,05
28,1	0,16 \pm 0,01	0,30 \pm 0,01	0,53 \pm 0,05
28,9	0,21 \pm 0,01	0,39 \pm 0,01	0,54 \pm 0,05
28,2	0,17 \pm 0,01	0,32 \pm 0,01	0,53 \pm 0,05
25,8	0,14 \pm 0,01	0,29 \pm 0,01	0,48 \pm 0,05

Fonte: Autoria própria (2023).

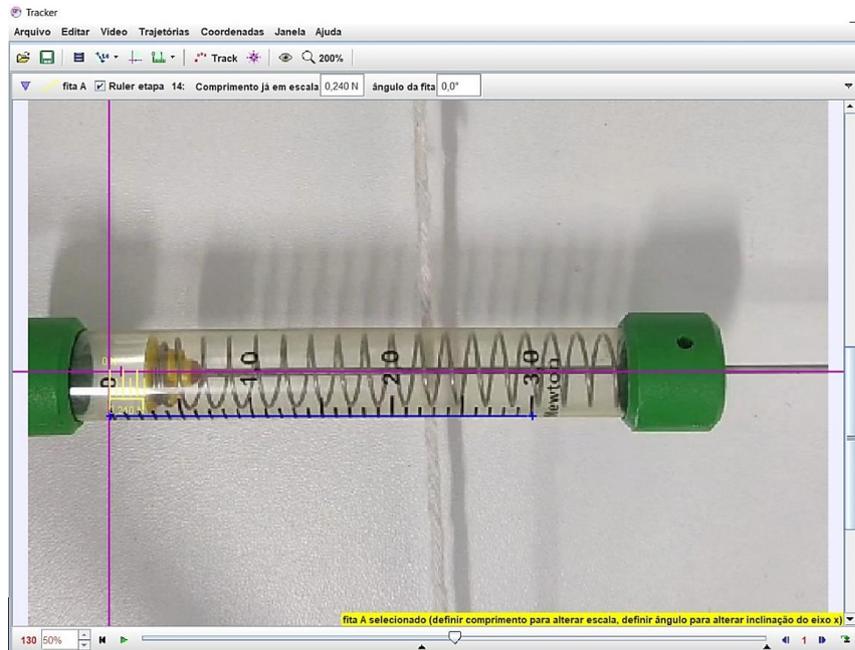
5.3 BLOCO DE GESSO

O bloco de gesso é vem de uma placa, onde foi demarcado um recorte e com o auxílio de um arco de serra foi separado para os eventuais testes. Foi observado que a parte do bloco de gesso que atritará com a rampa não estava lisa o suficiente para a experimentação, foi então que mediante o uso de uma lixa super fina de grão 360 (corresponde a 360 grãos distribuídos por polegada linear), típica para polimento, iniciou-se a lixar a face de gesso com certa delicadeza pois o mesmo se quebrava facilmente.

Repetindo o procedimento é perfurado a parte superior do gesso e encaixado uma cavilha para que possa segurar o gancho do dinamômetro. Novamente, as Figuras 12 e 13 junto as tabelas 7 e 8, fazem expõem os métodos e resultados obtidos.

I. Plano Horizontal

Figura 12 – Captura do *Tracker* (dinamômetro arrastando o bloco de gesso)



Fonte: Autoria própria (2023).

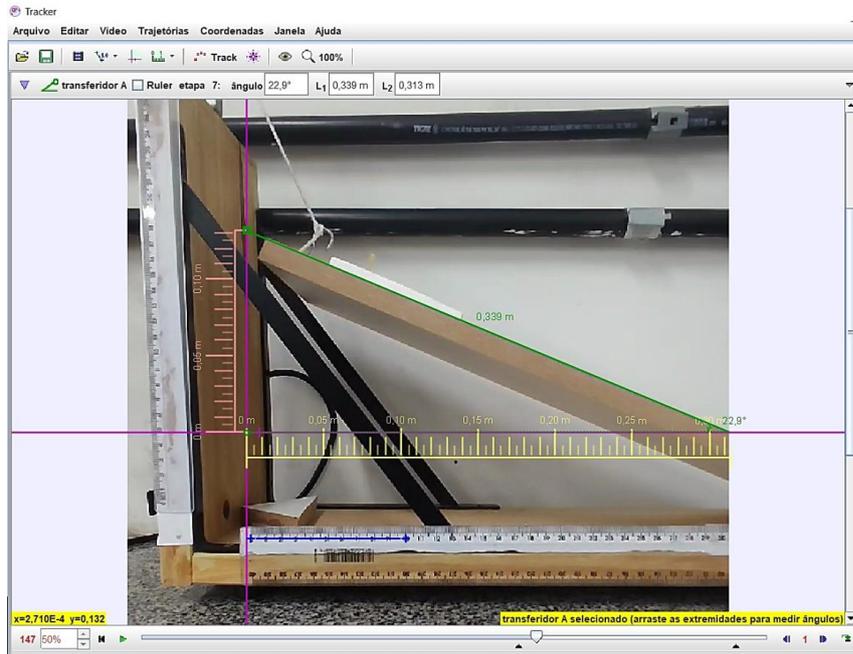
Tabela 7 – Medidas do atrito estático (dinamômetro arrastando o bloco de gesso)

Tração no dinamômetro (Força de atrito estático) $(F_d \pm \Delta F_d)$ N	Coefficiente de atrito estático $(\mu_e \pm \Delta \mu_e)$
0,24 \pm 0,01	0,35 \pm 0,01
0,28 \pm 0,01	0,41 \pm 0,01
0,21 \pm 0,01	0,30 \pm 0,01
0,23 \pm 0,01	0,33 \pm 0,01
0,23 \pm 0,01	0,33 \pm 0,01
0,27 \pm 0,01	0,39 \pm 0,01
0,24 \pm 0,01	0,35 \pm 0,01
0,19 \pm 0,01	0,28 \pm 0,01
0,22 \pm 0,01	0,32 \pm 0,01
0,25 \pm 0,01	0,36 \pm 0,01

Fonte: Autoria própria (2023).

II. Plano Inclinado

Figura 13 – Captura do Tracker (bloco de gesso sobre plano inclinado)



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 8 – Medidas para o atrito estático (bloco de gesso no plano inclinado)

Angulação (θ)°	Cateto oposto ($l_1 \pm \Delta l_1$)m	Cateto adjacente ($l_2 \pm \Delta l_2$)m	Coefficiente de atrito estático ($\mu_e \pm \Delta \mu_e$)
22,9	0,13 \pm 0,01	0,31 \pm 0,01	0,42 \pm 0,04
21,8	0,12 \pm 0,01	0,30 \pm 0,01	0,40 \pm 0,04
22,4	0,14 \pm 0,01	0,34 \pm 0,01	0,41 \pm 0,04
19,9	0,13 \pm 0,01	0,36 \pm 0,01	0,36 \pm 0,04
22,6	0,16 \pm 0,01	0,38 \pm 0,01	0,42 \pm 0,04
21,5	0,11 \pm 0,01	0,28 \pm 0,01	0,39 \pm 0,04
22,3	0,14 \pm 0,01	0,34 \pm 0,01	0,41 \pm 0,04
21,7	0,15 \pm 0,01	0,38 \pm 0,01	0,39 \pm 0,04
22,5	0,15 \pm 0,01	0,37 \pm 0,01	0,41 \pm 0,04
21,1	0,13 \pm 0,01	0,34 \pm 0,01	0,38 \pm 0,04

Fonte: Autoria própria (2023).

6 CONCLUSÕES

O intuito principal para realização deste trabalho é construir tal aparato experimental, um tribômetro que possa ter simples funcionamento e uma aplicação que possibilite mediações para o ensino de física experimental, mais especificamente no estudo da fricção e determinação de coeficientes de atrito.

Os resultados calculados para desvio padrão indicam o quanto esses valores da amostra se desviam da média. Pode-se observar que a dispersão dos dados em torno da mesma não representa uma alta variabilidade, como mostrado na tabela abaixo:

Tabela 9 – Média e Desvio padrão da amostra dos coeficientes de atrito estático

Material	Média dos coeficientes de atrito estático ($\bar{\mu}_e$)		Desvio padrão da amostra (σ)	
	I	II	I	II
Fórmica	0,274	0,329	0,023	0,020
Borracha	0,463	0,530	0,020	0,025
Gesso	0,342	0,399	0,039	0,019

Fonte: Autoria própria (2023).

O complemento com o *Tracker*, forma uma combinação versátil para a exploração desses fenômenos microscópicos, além de mensurar a intensidade dos mesmos. A tabela a seguir indica os valores encontrados em porcentagem, para os erros percentuais para as médias $\bar{\mu}_e$ uem ambas ocasiões, um comparativo entre os resultados obtidos:

Tabela 10 – Diferença percentuais nos dois casos descritos

Material	Diferença percentual de (μ_e %)
Fórmica	16,7%
Borracha	12,6%
Gesso	14,3%

Fonte: Autoria própria (2023).

Os erros tidos como grosseiros na coleta de dados, ou até mesmo a participação de forças externas e vibrações podem ter ocasionado uma distinção acentuada nos resultados. Evidentemente algum parâmetro na perspectiva da captura de imagens da gravação, vibração no eixo do motor de micro-ondas durante as rotações, ou até mesmo tremores na bancada de apoio pode ter influenciado na diferença entre os valores para atrito estático.

Como o trabalho objetiva, para além dessa comparação entre as medidas e os coeficientes nos planos, inclinado e horizontal, é indiscutível que o modelo experimental ofereça uma gama de aplicações práticas juntamente ao *Tracker*. O enfoque estabelecido pelo comparativo entre os coeficientes pode ser adaptado para uma relação com a área de contato real, massa dos blocos, até mesmo a Lei da Inércia, discursos vistas em capítulos anteriores.

Portanto, é inegável que o modelo experimental construído neste trabalho proporciona uma ampla variedade de estudos sobre o atrito em conjunto com o *Tracker* e demais softwares que possam adquirir dados e informações significativas, que possam se aximiladas em diferentes perspectivas.

REFERÊNCIAS

ALVES-MAZZOTTI, A. J.; GEWANDSZNAJDER, F. **O método nas ciências naturais e sociais**: pesquisa quantitativa e qualitativa. São Paulo: Pioneira, 1998.

ALVES, P. L.; FERREIRA, M.; FILHO, O. L. S. UMA PROPOSTA DE MEDIAÇÃO: O USO DO SOFTWARE TRACKER NO ENSINO DE FÍSICA, **Physicae Organum**, v. 5, n. 1, mar. 2019.

ARAÚJO, M. S. T; ABIB, M. L. V. S. Atividades Experimentais no Ensino de Física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, p. 176-194, 2003.

AMARAL, Pedro Luiz Fiad do. **Influência da pressão nominal de contato no coeficiente de atrito estático em plano inclinado automatizado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

BASSE, Jorn Larse. **Introduction to friction**, ASM HandBook Volume 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology, National Science Foundation, 1992.

BROWN, D. **Tracker**: video analysis and modeling tool. Versão 6.1.3 2023. S.I. Disponível em: <https://physlets.org/tracker/> Acesso em 20/07/2023.

GASPAR, A. **Compreendendo a Física**: Mecânica. Manual do professor. 3. Ed. São Paulo: Editora Ática, 2016.

GIL, Antonio Carlos et al. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

HALLIDAY, D.; RESNICK R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 8. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2009. 1 v.

HUTCHINGS, Ian M. Leonardo da Vinci's studies of friction. **Wear**, v. 360, p. 51-66, 2016.

LUDEMA, K.C., **Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology**, CRC Press, 1996.

MATUO, Celso Yuji; MARINELLI, Jose Ricardo. Importancia do calculo da propagação de erros em um experimento de atrito estático. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 24, n. 1, p. 132-139, 2007.

MONTEIRO, Isabel Cristina de Castro; GASPAR, Alberto; MONTEIRO, Marco Aurélio Alvarenga. Abordagem experimental da força de atrito em aulas de Física do Ensino Médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, p. 1121-1136, 2012.

MOSSMANN, V. L. F.; MELLO, K. B.; CATELLI, F.; LIBARDI, H.; DAMO, I. S. Determinação dos coeficientes de atrito estático e cinético utilizando-se a aquisição automática de dados. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n. 2, 2002.

NEIDE, I. G. **Estudo do atrito de um dímero deslizando sobre um potencial periódico bidimensional**. Dissertação de Mestrado, 2007.

NEIDE, I. G. **Efeitos rotacionais no atrito não linear de um dímero deslizando sobre um substrato periódico unidimensional**. Tese [Doutorado em Ciências], Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica: Mecânica (vol. 1)**. Editora Blucher, 2013.

RADI, Polyana Alves et al. Tribologia, conceitos e aplicações. **ANAIS DO 13º ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA (XIII ENCITA). XIII., São José dos Campos**. Anais [...]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2007.

PIACENTINI, J. J.; GRANDI, B. C. S.; HOFMANN, M. P.; LIMA, F. R. R.; ZIMMERMANN, E. **Introdução ao laboratório de Física**. 2 ed. rev. Florianópolis: Ed. da UFSC. 2001.

RADI, Polyana Alves et al. Tribologia, conceitos e aplicações. **ANAIS DO 13º ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUÇÃO DO ITA (XIII ENCITA). XIII., São José dos Campos**. Anais [...]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2007.

SÉRÉ, Marie-Geneviève; COELHO, Suzana Maria; NUNES, António Dias. O papel da experimentação no ensino da física. **Caderno brasileiro de ensino de física**, v. 20, n. 1, p. 30-42, 2003.

SILVEIRA JÚNIOR, R. N; TEDESCO, J. C. G; QUEIROZ, G. P. A dependência da área real de contato no atrito entre superfícies sólidas, **Anais do XIV Simpósio Nacional de Ensino de Física - SNEF**, 2005.

SINATORA, A. **TRIBOLOGIA: UM RESGATE HISTÓRICO E O ESTADO DA ARTE**. Prova de Erudição, São Paulo, 2005

TELES, Ana Leticia Filgueiras et al. Caracterização de atrito estático e dinâmico através de plano inclinado com sistema de aquisição de sinais. **International Journal of Development Research**, v. 11, n. 01, p. 44606-44611, 2021.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros - Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica**. 6.ed. LTC, 2009.

APÊNDICE A –REGISTRO DA CONSTRUÇÃO E PRÁTICA DO MODELO EXPERIMENTAL

