



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DE ENSAIOS COM BASE NA NORMA  
BRASILEIRA NBR ISO 12957-2**

**NAYURY MELO DE SOUSA**

**TUCURUÍ – PA**

**2025**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DE ENSAIOS COM BASE NA NORMA  
BRASILEIRA NBR ISO 12957-2**

**NAYURY MELO DE SOUSA**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade  
De Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como  
Parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro  
Mecânico.**

**Orientador:**

**Prof. Dr. Jessé Luís Padilha**

**TUCURUÍ – PA**

**2025**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DE ENSAIOS COM BASE NA NORMA  
BRASILEIRA NBR ISO 12957-2**

**NAYURY MELO DE SOUSA**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade  
De Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como  
Parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro  
Mecânico.**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Orientador: Prof. Dr. Jessé Luís Padilha**

**FEM/CAMTUC/UFPA**

---

**Coorientador: Prof. Me. Danilo Silva Santos**

**FEM/CAMTUC/UFPA**

---

**Membro Interno: Profº Me. Arthur dos Reis Lemos Fontana**

**FEM/CAMTUC/UFPA**

---

**Membro Interno: Profº Meº Maycon Magalhães Castro**

**FEM/CAMTUC/UFPA**

**Conceito**   EXC  

**Tucuruí,   03   de   abril   de 2025.**

## RESUMO

O presente trabalho aborda o dimensionamento e a construção de uma bancada de ensaios destinada ao estudo das propriedades de atrito em materiais granulares. Sua construção é guiada pela necessidade de compreender o comportamento de grânéis em contextos específicos, considerando a interação entre superfícies sólidas, tendo como base a Norma Brasileira NBR ISO 12957-2. O projeto visa proporcionar uma ferramenta precisa para o estudo sobre as forças envolvidas nesse fenômeno complexo, destacando a influência de diferentes materiais na resposta do atrito. Ao integrar parâmetros como a rugosidade das superfícies e as características granulométricas, busca-se oferecer uma plataforma experimental robusta para investigar e compreender as nuances do atrito em condições de parede, e a interação entre partículas. Ao término da construção do projeto, foram conduzidos testes para avaliar a eficácia da bancada por meio da análise das medições do ângulo de atrito. Essas análises foram realizadas considerando os parâmetros estabelecidos pelas condições experimentais propostas pela norma. Foram encontrados valores de atrito de parede, atrito interno e coeficiente de atrito para pelota e minério granulado próximos aos da literatura. Isso evidenciou o sucesso da bancada, atingindo os objetivos propostos de forma satisfatória.

Palavras-chave: Construção; Atrito de Parede; Materiais Granulares.

## **ABSTRACT**

The present work addresses the design and construction of a testing bench intended for the study of friction properties in granular materials. Its construction is guided by the need to understand the behavior of bulk materials in specific contexts, considering the interaction between solid surfaces, based on the Brazilian Standard NBR ISO 12957-2. The project aims to provide an accurate tool for studying the forces involved in this complex phenomenon, highlighting the influence of different materials on the friction response. By integrating parameters such as surface roughness and granulometric characteristics, the goal is to offer a robust experimental platform to investigate and understand the nuances of friction under wall conditions and the interaction between particles. Upon completion of the project, tests were conducted to assess the effectiveness of the bench through the analysis of friction angle measurements. These analyses were performed considering the parameters established by the experimental conditions proposed by the standard. Friction values for wall friction, internal friction, and the coefficient of friction for pellet and granulated ore were found to be close to those in the literature. This demonstrated the success of the bench, achieving the proposed objectives satisfactorily.

**Keywords:** Construction; Wall Friction; Granular Materials.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de aparelho de cisalhamento .....	18
Figura 2 – Diagrama de execução.....	20
Figura 3 – Modelo esquemático da bancada. ....	21
Figura 4 – (a) Cunhas internas, (b) Caixa finalizada. ....	22
Figura 5 – Modelo final dos trilhos.....	22
Figura 6 – Componentes da aplicação de força normal.....	23
Figura 7 – Apresentação dos mecanismos de inclinação e interrupção.....	25
Figura 9 – Diagrama de ensaios. ....	26
Figura 10 – Etapas do processo de umidificação das amostras.....	27
Figura 11 – Valores de ângulos.....	31
Figura 12 – Valores de coeficiente de atrito.....	32
Figura 13 – Valores de coeficientes de atrito. ....	33

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Componentes de subida e interrupção dos ensaios

Tabela 2. Valores encontrados para Pelota (Partícula a Parede).

Tabela 3. Valores encontrados para minério granulado (Partícula Parede).

Tabela 4. Valores encontrados para pelota (Entre partículas).

Tabela 5. Valores encontrados para minério granulado (Entre partículas).

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\rho$  - Massa específica

$\phi_e$  - Ângulo de atrito interno efetivo

$\phi_w$  - Ângulo de atrito interno com a parede

C - Coesão

u - Teor de umidade

$\square_{\square}$  - Atrito estático

$\mu_{\square}$  - Coeficiente de atrito estático

$\square_{\square}$  - Força normal

$\square_{\square}$  - Atrito cinético

$\mu_{\square}$  - Coeficiente de atrito cinético

$\square_{\square}$  - Massa de água

$\square_{\square}$  - Massa de material

$\sigma_{\square,\square}$  - Tensão normal

$\beta$  - Ângulo de escorregamento

$\square$  - Massa de solo

$\square$  - Área

$\square$  - Tensão cisalhante

$\square_{\square(\square)}$  - Força requerida para reter a caixa superior vazia

$\sigma_{\square,\square}$  - Tensão normal na inclinação  $\beta$

$\square\square\square$  - Tangente

*sin* - seno

*cos* - cosseno

$^{\circ}$  - Graus

kPa - Quilo Pascal

% - Por cento

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

SSTT – Standard Shear Test Technique

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	11
1.1 OBJETIVO GERAL .....	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 MATERIAIS GRANULARES .....	13
2.2 MINÉRIO GRANULADO E PELOTA .....	13
2.3 PROPRIEDADES .....	15
2.2.1 Coeficiente de Atrito.....	15
2.2.2 Coesão .....	16
2.2.3 Ângulo de Atrito .....	17
2.3 CÉLULA DE CISALHAMENTO .....	17
2.4 NBR ISO 12957-2:2013 .....	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	20
3.1 DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO DOS COMPONENTES.....	21
3.1.1 Caixa superior .....	21
3.1.2 Trilhos.....	22
3.1.3 Aplicação da força normal .....	23
3.1.4 Caixa Inferior .....	23
3.1.5 Mecanismo de inclinação e parada do experimento .....	24
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	26
4. RESULTADOS .....	30
5. CONCLUSÕES.....	34
RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	35
REFERÊNCIAS .....	36

## 1. INTRODUÇÃO

Desde a areia até os cereais, desde avalanches de rochas até agregados interplanetários como os anéis de Saturno e o cinturão de asteroides, meios granulares formam uma família extremamente vasta, composta por grãos com formas e materiais muito diferentes, que podem abranger várias ordens de magnitude em tamanho (Andreotti, Forterre, Pouliquen, 2013). No entanto, apesar das aparências, a matéria no estado granular combina alguns dos aspectos mais complexos dos sistemas físicos conhecidos; até o momento, uma compreensão detalhada de seu comportamento permanece elusiva (Mehta, 2007).

Uma motivação fundamental para pesquisas nessa área reside na sua participação significativa em uma variedade de fenômenos, tanto industriais quanto naturais. É estimado que mais da metade das transações comerciais em todo o mundo envolvem produtos que passam por algum processo de manuseio de materiais granulares em algum ponto de sua produção, o que os coloca como o segundo tipo de material mais amplamente utilizado na indústria, logo após a água (Duran, 1998; Andreotti *et al.*, 2013).

Com isso, físicos e engenheiros têm desenvolvido técnicas e experimentos para mensurar diversas propriedades desses materiais. Um dos parâmetros fundamentais nesse estudo é o ângulo de atrito interno, desempenhando um papel essencial na resistência ao cisalhamento e na capacidade de fluxo desses materiais. Além disso, suas interações com superfícies de contenção, conhecida como atrito de parede, exerce uma influência direta sobre seu comportamento em silos, dutos e processos de transporte. Portanto, a análise do ângulo de atrito interno e do atrito de parede é essencial para otimizar o manuseio e o armazenamento de materiais granulares em diversas aplicações industriais (Palma, 2005; Sadovskaya, Sadovskii, 2012).

A norma ABNT NBR ISO 12957-2 estabelece parâmetros para a construção de uma bancada de ensaios para materiais granulares, fornecendo diretrizes detalhadas e específicas para garantir que essas estruturas atendam aos requisitos necessários para conduzir ensaios confiáveis. Ela define critérios essenciais para o dimensionamento, os materiais de construção, a geometria e o sistema de carga dessas bancadas, levando em consideração fatores como a geometria da célula de ensaio, a pressão de confinamento e a capacidade de aplicar cargas de forma controlada. Além disso, a norma oferece orientações detalhadas sobre como realizar os ensaios propriamente ditos, incluindo procedimentos para a preparação de amostras, o monitoramento de pressões e deformações, bem como a coleta e análise de dados. O

procedimento envolve a utilização de uma aparelhagem de plano inclinado para avaliar o desempenho desses materiais quando submetidos a condições de campo específicas.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Construir uma bancada de ensaios para avaliação das propriedades de atrito de materiais granulares, utilizando um plano inclinado como base, conforme os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR ISO 12957-2.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dimensionar e construir os componentes da bancada de ensaios, incluindo a caixa superior, trilhos, sistema de aplicação da força normal, mecanismo de inclinação e sensores de medição;
- Realizar ensaios experimentais para determinar os ângulos de deslizamentos e seus coeficientes de atrito de pelota e minério granulado;
- Comparar com resultados obtidos com valores previamente documentados na literatura, verificando a eficácia da bancada construída.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 MATERIAIS GRANULARES**

A tecnologia industrial usada no tratamento de materiais granulares envolve uma série de processos. Primeiro vem a extração de minérios, areias e cascalho, que muitas vezes depende de dragagem. Em seguida, vem o esmagamento e a moagem, seguidos pela separação, todos os quais são comumente usados com materiais de baixo valor agregado. Uma vez que as matérias-primas frequentemente representam mais de 85% do custo total, é fácil entender por que tão pouco esforço foi empregado para melhorar a tecnologia básica, que muitas vezes remonta ao século XIX. Não muito foi otimizado, apesar do fato de que os métodos de transporte (leitos fluidizados, esteiras transportadoras), armazenamento (silos) e mistura (por exemplo, caminhões de cimento) estão presentes em todas as etapas do processamento industrial de agregados (Duran, 1998).

Considerando que a caracterização do produto granular envolve a análise e determinação das propriedades de fluxo, as características observadas estão intrinsecamente relacionadas ao comportamento do produto, emergindo das forças que impactam as partículas individuais. A determinação das propriedades físicas é crucial para definir a fluidez de um produto, uma vez que as forças interparticulares exercem influência direta sobre o padrão de escoamento (Palma, 2005).

### **2.2 MINÉRIO GRANULADO E PELOTA**

O minério de ferro desempenha um papel fundamental na economia brasileira, sendo um dos principais produtos de exportação do país. Em 2020, mesmo diante dos desafios impostos pela pandemia da Covid-19, a exportação dessa commodity cresceu 16% em relação a 2019, alcançando um faturamento de US\$26 bilhões (ABM, 2021). Esse crescimento consolidou o minério de ferro como um dos pilares da balança comercial brasileira, representando uma parcela significativa das receitas de exportação. Além disso, a China continua sendo o maior mercado consumidor desse insumo, fortalecendo a relação comercial entre os dois países e garantindo demanda contínua para a produção nacional. O setor mineral, impulsionado principalmente pela Vale, também gera milhares de empregos diretos e indiretos, movimentando a economia das regiões mineradoras, especialmente no estado do Pará, onde

está localizado o Complexo Minerador de Carajás, uma das maiores jazidas do mundo (VALE, 2018). Esse cenário reforça a importância da cadeia logística eficiente e dos investimentos em infraestrutura para manter a competitividade do Brasil no mercado global de commodities minerais (COMEXSTAT, 2020).

O beneficiamento de minério tem como principal objetivo aumentar o teor de ferro e reduzir as impurezas antes que o minério seja utilizado na produção de aço. Esse processo ocorre em diversas etapas, incluindo:

- **Britagem e Moagem:** Fragmentação do minério em partículas menores, aumentando a área de superfície para posterior concentração (FUERSTENAU & HAN, 2003).
- **Classificação e Separação:** Utilização de processos físicos e químicos para a separação de minerais indesejáveis. Métodos como separação magnética e flotação são comuns no beneficiamento de minérios de ferro (YOVANOVIC, 2003).
- **Desaguamento e Filtragem:** Remoção do excesso de umidade para facilitar o transporte e processamento posterior.

A eficiência do beneficiamento depende diretamente da mineralogia do minério extraído. Enquanto hematita e magnetita são os minerais de ferro mais comuns, a presença de impurezas como sílica e alumina pode impactar negativamente a qualidade do minério processado (LU, 2015).

Após o beneficiamento, uma parte do minério de ferro é utilizada diretamente nos altos-fornos das siderúrgicas. No entanto, para melhorar a eficiência dos processos siderúrgicos, uma parcela significativa do minério passa pelo processo de pelotização. Esse método consiste na aglomeração de finos de minério em esferas uniformes, denominadas pelotas de ferro, que apresentam maior permeabilidade nos altos-fornos e nos reatores de redução direta (PIETSCH, 2001).

O processo de pelotização ocorre em três principais etapas:

1. **Preparação da Matéria-Prima:** O minério fino é misturado a aglomerantes, como bentonita, e redutores de impurezas.
2. **Formação das Pelotas:** O material é transformado em pequenas esferas por meio de discos ou tambores rotativos.

3. **Queima e Endurecimento:** As pelotas são submetidas a altas temperaturas (1.200–1.350°C), adquirindo resistência mecânica para suportar os processos metalúrgicos subsequentes (FUERSTENAU & HAN, 2003).

A pelletização tem um impacto ambiental positivo, pois permite o aproveitamento de finos de minério que seriam descartados, reduzindo a geração de rejeitos e aumentando a eficiência da cadeia produtiva do ferro (LU, 2015).

## 2.3 PROPRIEDADES

Destaca-se a necessidade de determinar as propriedades físicas que influenciam o comportamento do produto em condições de fluxo, considerando variáveis como pressão, geometria e rugosidade das paredes do silo, bem como as características dos dispositivos de descarga. Entre as propriedades mais relevantes, incluem-se: massa específica ( $\rho$ ), ângulo de atrito interno do produto com a parede ( $\phi_w$ ), coesão ( $C$ ), teor de umidade ( $u$ ) e granulometria. Essas propriedades são fundamentais para prever o comportamento do material durante o armazenamento e a descarga, afetando diretamente a escolha da geometria do silo e os métodos de projeto dos dispositivos de escoamento (Palma, 2005).

### 2.2.1 Coeficiente de Atrito

O atrito é um fenômeno fundamental da mecânica que descreve a resistência ao movimento relativo entre superfícies em contato. Segundo Nussenzveig (2007), a força de atrito pode ser classificada em atrito estático, que impede o início do movimento, e atrito cinético, que atua quando um corpo já está em movimento.

O parâmetro depende das propriedades dos materiais em contato. No entanto, Feynman (2010) destaca que essa relação é uma aproximação empírica, pois o comportamento real do atrito envolve interações microscópicas entre superfícies, como adesão molecular e deformações plásticas. Já Kleppner e Kolenkow (2014) enfatizam que o atrito também pode ser analisado sob a perspectiva da conservação da energia mecânica, pois dissipa energia na forma de calor, influenciando diretamente a eficiência de sistemas mecânicos e industriais. Além disso, a variação do coeficiente de atrito depende de fatores como a rugosidade das superfícies, a velocidade do movimento relativo e a presença de lubrificantes, demonstrando que a modelagem do atrito deve levar em conta características específicas de cada situação.

Segundo Halliday (2011), o atrito estático ( $f_s$ ) é a força que impede o deslizamento de um corpo sobre uma superfície quando uma força externa é aplicada. Ele se ajusta à força aplicada até atingir um valor máximo, além do qual o movimento se inicia.

Enquanto a força aplicada for menor que ( $f_{s,máx}$ ), o corpo permanece em repouso e a força de atrito estático equilibra a força externa aplicada (NUSSENZVEIG, 2007).

Halliday (2011) também afirma que assim que a força aplicada ultrapassa ( $f_{s,máx}$ ), o corpo entra em movimento e o atrito passa a ser o atrito cinético ( $f_k$ ). Diferentemente do atrito estático, o atrito cinético tem um valor constante, independentemente da força aplicada, desde que não haja variações na normal ou na superfície.

Segundo Feynman (2010), essa redução no atrito ocorre porque, em movimento, as ligações microscópicas entre as superfícies têm menos tempo para se formar, reduzindo a resistência ao deslizamento. Kleppner e Kolenkow (2014) complementam que o atrito cinético pode variar com a velocidade relativa e com fatores como temperatura e lubrificação.

### 2.2.2 Coesão

Em materiais granulares úmidos, a força de coesão é significativamente afetada pela formação de pontes líquidas entre as partículas no fluxo. A força coesiva, que tende a aglomerar as partículas, é gerada pela presença dessas pontes líquidas e está diretamente relacionada à tensão superficial do líquido e à granulometria do material (Gröger, Tuzun, Heyes; 2003). Nos materiais granulares com umidade, a coesão entre as partículas é amplamente influenciada pela criação de pontes líquidas durante o fluxo, onde a tendência das partículas de se aglomerarem decorre da formação dessas pontes (Baia, et al, 2024).

Conforme citado por Naka (2010), Holdich (2002) sugere em sua pesquisa que, em determinadas condições, a umidade pode facilitar o escoamento de produtos em pó armazenados em silos específicos, atuando como um agente lubrificante ou prevenindo a geração de forças que poderiam interromper o fluxo. Além disso, a atração eletrostática entre as partículas reduz a coesão e o atrito interno, impedindo, assim, a interrupção do próprio fluxo.

Mitarai e Nori (2006) destacam a necessidade de compreender melhor as propriedades mecânicas de montagens granulares úmidas, tanto em pequena quanto em grande escala. Esses autores corroboram que "a umidade pode causar coesão em um meio granular, unindo as

partículas". A formação dessas pontes líquidas, também conhecidas como pontes capilares, é responsável por uma série de fenômenos que afetam a escoabilidade do material, incluindo a formação de aglomerados e a segregação de partículas de diferentes tamanhos.

A intensidade dessa coesão depende diretamente da quantidade de líquido presente. Conforme salientado por Pierrat e Caram (1997), a resistência à tração dos pós com teor de umidade inferior ao da região do estado pendular pode ser extrapolada, assumindo-se que é proporcional à força de ligação entre as partículas. No entanto, é importante notar que a coesão ocorre em materiais úmidos apenas enquanto o sistema não se torna excessivamente úmido, ou seja, completamente imerso em um líquido, o que elimina a formação de pontes capilares e altera significativamente as propriedades mecânicas do sistema.

### **2.2.3 Ângulo de Atrito**

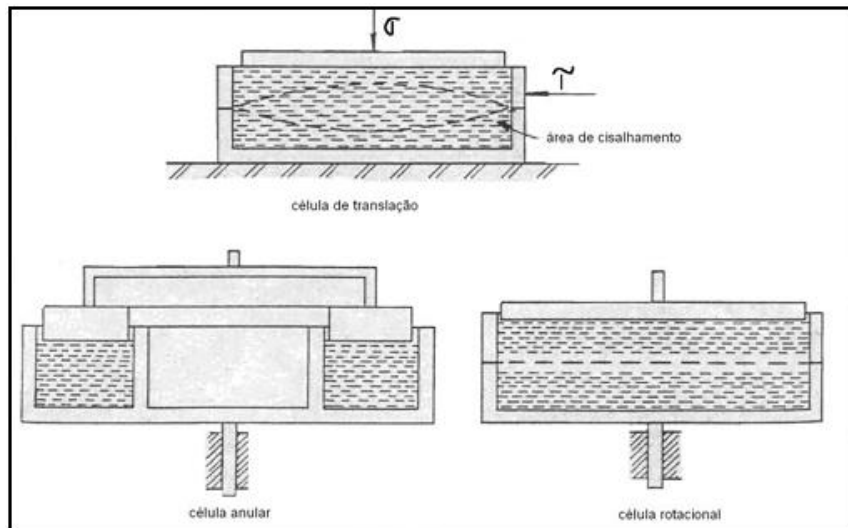
O ângulo de atrito é determinado observando-se o momento em que a caixa preenchida com o solo começa a deslizar sobre a superfície da base ou do material geossintético. Esse ponto crítico reflete a interação entre as forças de cisalhamento e normais na interface, proporcionando um parâmetro fundamental para o estudo de estabilidade e resistência ao deslizamento em projetos de engenharia. Além disso, a capacidade de variar as condições de carga por meio das sobrecargas aplicadas permite uma análise mais abrangente e detalhada do desempenho dos materiais sob diferentes cenários de aplicação (ABNT NBR 12957-2.).

## **2.3 CÉLULA DE CISALHAMENTO**

O atrito de parede é tradicionalmente medido usando um testador de cisalhamento Jenike. Trata-se de uma ferramenta popular usada para analisar os ângulos cinemáticos de atrito de parede e a coesão de um sólido a granel quando deslizado sobre uma superfície, conforme descrito na Técnica Padrão de Teste de Cisalhamento (SSTT). O testador de cisalhamento Jenike consiste em um anel de cisalhamento com um diâmetro interno de 95,25 mm que retém o material a granel colocado na célula de cisalhamento sob uma força normal perpendicular. A limitação desse modelo é a restrição de tamanho máximo das partículas, que de acordo com a SSTT, o testador é adequado para partículas grosseiras com um diâmetro até 5% do diâmetro da célula de cisalhamento, mas partículas acima de 4 mm são tipicamente removidas (Grima, Mills, Wypych, 2010). Portanto, é necessário desenvolver métodos de medição das

propriedades de materiais granulares que incluam particulados com dimensões maiores. A figura 1 ilustra o funcionamento de uma célula de cisalhamento Jenike.

**Figura 1 – Tipos de aparelho de cisalhamento**



Fonte: CALIL JR, 1990

Neste estudo serão investigadas as propriedades de atrito de dois materiais, pelota e minério granulado, considerando ambos em condições úmidas. A compreensão aprofundada dessas propriedades é fundamental, uma vez que visa fornecer dados físicos reais para serem usados em simulações computacionais. Essas simulações, por sua vez, têm como propósito analisar e compreender o comportamento desses materiais em contextos relacionados a processo de fluxo e armazenamento.

#### 2.4 NBR ISO 12957-2:2013

A norma ABNT NBR ISO 12957-2:2013 estabelece os critérios e métodos para determinar as características de atrito de materiais em forma granular, utilizando o ensaio de plano inclinado. Este método é amplamente aplicado na avaliação do desempenho de interfaces entre geossintéticos e solos sob baixas tensões normais. O ensaio consiste em inclinar um plano rígido, no qual o material geossintético está em contato com o solo, até que ocorra o deslizamento da caixa superior que contém o solo. O ângulo de inclinação registrado no momento do deslizamento é utilizado para calcular o ângulo de atrito da interface do material. A norma descreve os requisitos da aparelhagem, como o sistema de elevação do plano e

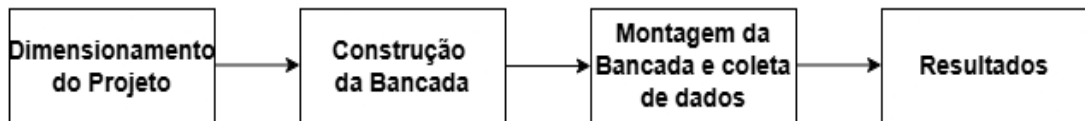
dispositivos de medição de ângulo e deslocamento, além das condições padronizadas para amostras e tensões normais aplicadas. O método pode ser aplicado tanto com solos específicos de campo quanto com areia padrão, servindo como um importante indicador do comportamento de materiais em situações práticas, como a estabilidade de aterros e reforço de encostas. Os resultados obtidos devem ser detalhados em relatório técnico, incluindo informações como identificação da amostra, tensões aplicadas, ângulo de atrito médio e observações sobre eventuais danos ou comportamentos atípicos.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O princípio fundamental deste experimento reside na medição do ângulo de atrito entre um material geossintético e o solo. Para realizá-lo, uma caixa é preparada contendo o material granular ou solo a ser estudado, com a possibilidade de aplicação de sobrecargas para simular condições de campo. Essas sobrecargas representam as pressões exercidas por camadas sobrepostas ou por outras forças atuantes no sistema, permitindo a análise do comportamento do material em diferentes estados de tensão. A base que sustenta a caixa é projetada para inclinar-se a uma velocidade constante e controlada, evitando variações bruscas que possam comprometer a precisão dos dados.

As etapas do processo da estrutura do projeto estão ilustradas na figura 2:

**Figura 2 – Diagrama de execução.**



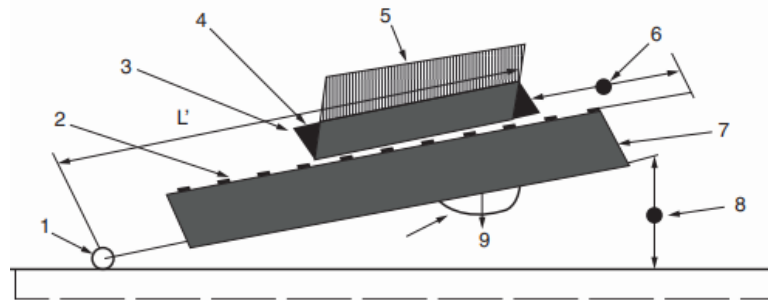
Fonte: Autoria Própria.

A norma ABNT NBR 12957-2 é utilizada como referência para padronizar o método de ensaio destinado à determinação das características de atrito de materiais granulares, garantindo não apenas a reprodutibilidade, mas também a comparabilidade dos resultados obtidos em diferentes condições experimentais. Essa norma estabelece critérios rigorosos para a execução de testes com o objetivo de medir o coeficiente de atrito em materiais sólidos, como pelotas e minérios granulares, e assegura que os dados gerados sejam confiáveis e consistentes.

A Figura 3 ilustra de maneira detalhada o modelo esquemático que descreve o funcionamento do experimento, proporcionando uma visão clara dos componentes e das etapas do processo. A representação inclui a disposição da caixa, que contém o material em análise, e a base inclinável, um elemento essencial para a realização do ensaio. Além disso, são destacados os mecanismos de aplicação de sobrecarga, que são fundamentais para simular as condições reais de operação dos materiais granulares. A precisão na apresentação desses

detalhes ajuda a esclarecer o procedimento adotado, garantindo que os ensaios sigam os parâmetros exigidos pela norma, e promove uma compreensão mais aprofundada da metodologia empregada para medir o atrito entre partículas e superfícies sólidas.

**Figura 3 – Modelo esquemático da bancada:** (1) Ponto de articulação; (2) corpo de prova; (3) cunhas internas; (4) caixa superior suportada em roletes com espaçamento de 1,5 mm; (5) carga para obter a tensão normal requerida; (6) medidor de deslizamento com interruptor de curso; (7) caixa inferior preenchida com solo; (8) dispositivo de elevação; (9) medidor de inclinação.



Fonte: ABNT NBR 12957-2.

### 3.1 DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO DOS COMPONENTES

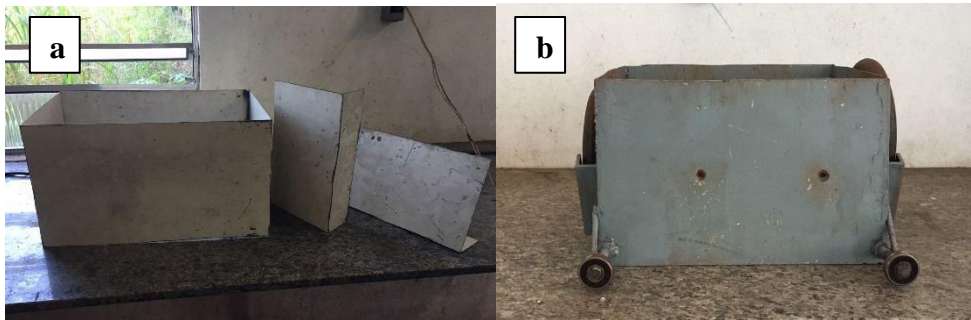
#### 3.1.1 Caixa superior

O modelo adotado para essa aplicação consiste em uma caixa superior sustentada por roletes e guias. A caixa foi projetada em conformidade com as dimensões mínimas estipuladas pela norma, que prescreve uma largura e comprimento de 300 mm de área útil, e altura de, no mínimo, sete vezes o diâmetro da maior partícula. Além disso, a caixa superior deve garantir que a linha de ação da força normal passe através do centro de gravidade da mesma quando o aparelho se inclina, ou seja, por cunhas ou faces inclináveis. O método utilizado para atender esse parâmetro foi o de cunhas com um ângulo padrão de 27 graus. A altura da cunha é de 150 mm e 75 mm de comprimento.

As dimensões finais da caixa superior são 375 mm de comprimento, 300 mm de largura e 200 mm de altura, construídos com uma chapa de aço carbono com 2 mm de espessura, conforme a Figura 2 (a). Para o sistema de roletes, foram empregues quatro rolamentos com 42 mm de diâmetro e 13 mm de largura, os quais foram acoplados em braços soldados em ambas as extremidades da caixa. Foi desenvolvido um sistema que permite a adição de peso a estrutura,

além de um mecanismo de contenção para o embolo que auxilia na aplicação da força normal, ambos visam garantir a estabilidade durante o ensaio. A Figura 2 (b) apresenta o resultado final da caixa (ABNT NBR 12957-2):

**Figura 4 – (a) Cunhas internas, (b) Caixa finalizada.**



Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.1.2 Trilhos

Os trilhos desempenham um papel fundamental no experimento, sendo responsáveis por assegurar que a caixa superior se mova corretamente ao longo da base inclinada, mantendo a trajetória desejada e permitindo medições precisas do atrito. Para sua construção, optou-se por perfis de tubo retangular com 3 mm de espessura, apresentando as dimensões de 50 mm de altura, 21 mm de largura e 600 mm de comprimento, que oferecem robustez e estabilidade adequadas para suportar o peso da caixa e os movimentos durante o ensaio.

Para garantir o acoplamento adequado dos trilhos à base de ensaio, foram soldados tubos de 15 mm de diâmetro, posicionados a uma distância de 100 mm de cada extremidade da guia, criando um sistema de fixação eficiente e seguro. Essa configuração assegura que os trilhos permaneçam firmemente fixados durante os testes, prevenindo qualquer deslocamento indesejado que possa afetar a precisão dos resultados.

Além disso, para viabilizar ensaios entre partículas, calços foram fabricados com a finalidade de elevar os trilhos. Essa elevação proporciona a altura necessária para permitir que os testes sejam realizados entre as partículas de forma eficaz. A figura 5 ilustra o modelo final dos trilhos.

**Figura 5 – Modelo final dos trilhos.**

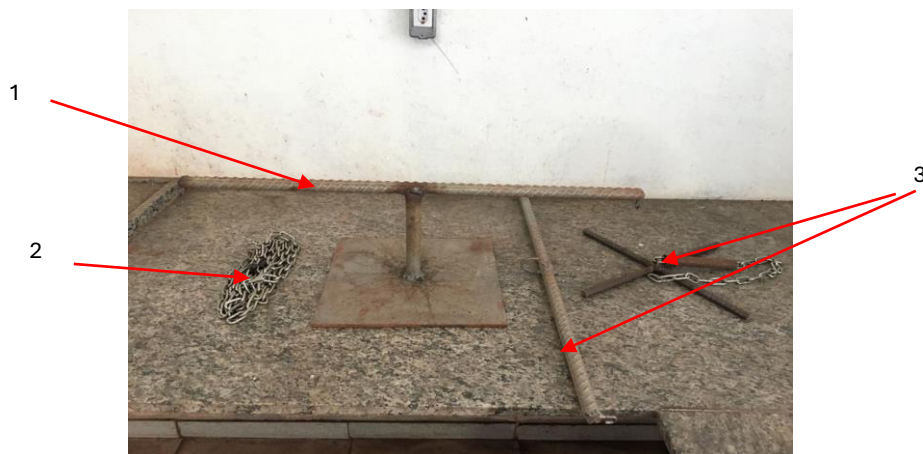


Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.1.3 Aplicação da força normal

O sistema para aplicação da força normal foi composto por três componentes: Êmbolo: Responsável por distribuir uniformemente a força normal, o êmbolo é posicionado na parte superior do corpo da amostra, dentro da caixa superior. Suas dimensões de 290 mm de largura por 290 mm de comprimento foram selecionadas para garantir a distribuição uniforme de pressão; Suporte Inferior: O suporte inferior desempenha a função de suportar os pesos utilizados para aplicar a força normal; Elo de Correntes: tem como finalidade conectar o suporte inferior ao êmbolo, proporcionando a integração adequada do sistema. A Figura 6 mostra os componentes finais.

**Figura 6 – Componentes da aplicação de força normal: (1) Êmbolo; (2) Elo de correntes; (3) Suporte inferior.**



Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.1.4 Caixa Inferior

A caixa inferior utilizada nos ensaios para avaliação do atrito entre partículas apresenta dimensões de 400 mm de largura, 650 mm de comprimento e 70 mm de altura, sendo fabricada em chapa de ferro carbono com espessura de 2 mm. Essa construção robusta assegura a resistência necessária para suportar as condições de teste, ao mesmo tempo que proporciona estabilidade durante os ensaios. A capacidade volumétrica útil da caixa é de aproximadamente 18 litros, permitindo acomodar uma quantidade adequada de material para realizar medições precisas e consistentes, em conformidade com os requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR 12957-2.

### 3.1.5 Mecanismo de inclinação e parada do experimento

O mecanismo usado para elevar o plano inclinado foi provido de um disjuntor que interrompeu automaticamente a elevação quando o deslocamento da caixa superior, preenchida com solo, exceder 50 milímetros. Além disso, a aparelhagem foi equipada com um sistema de medição que permita a medida do ângulo de inclinação com uma precisão de  $\pm 0,5$  graus (ABNT NBR 12957-2). O mecanismo de inclinação e interrupção utilizado é composto pelos seguintes itens:

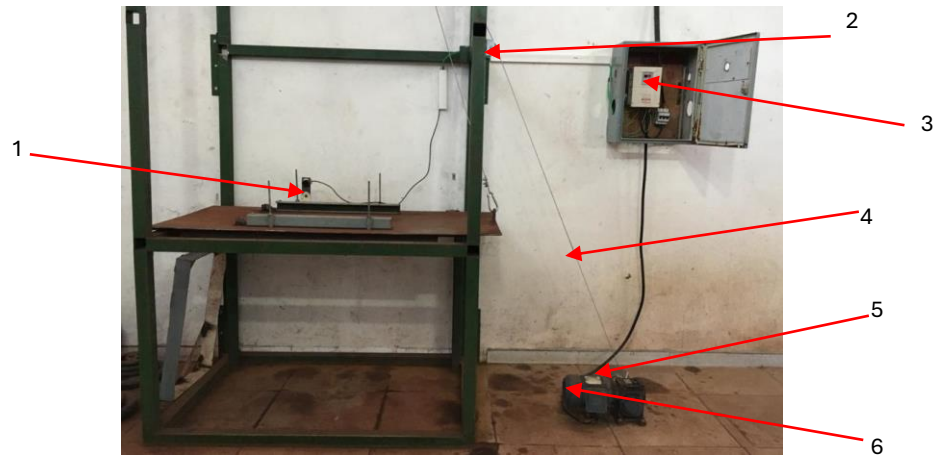
**Tabela 1 – Componentes de subida e interrupção dos ensaios**

<b>Componente</b>	<b>Quantidade</b>
Inversor Toshiba VF-S7 200 V-3.7kW	1
Motor Eberle B 72 a4 1/2cv	1
Redutor Cestalto MCR 400 1:60	1
Sensor Nazda Fotoelétrico NZ-CGY30E-D70NC	1
Cabo elétrico 3 mm	5 m

Fonte: Autoria própria (2023).

A velocidade de subida da rampa é controlada por polias e cabos, acoplados a um redutor, que por sua vez, está conectado a um motor elétrico trifásico controlado por um inversor de frequência. O mecanismo também conta com um sensor responsável por interromper o funcionamento do motor através de um comando elétrico. A Figura 7 mostra o esquema utilizado na máquina.

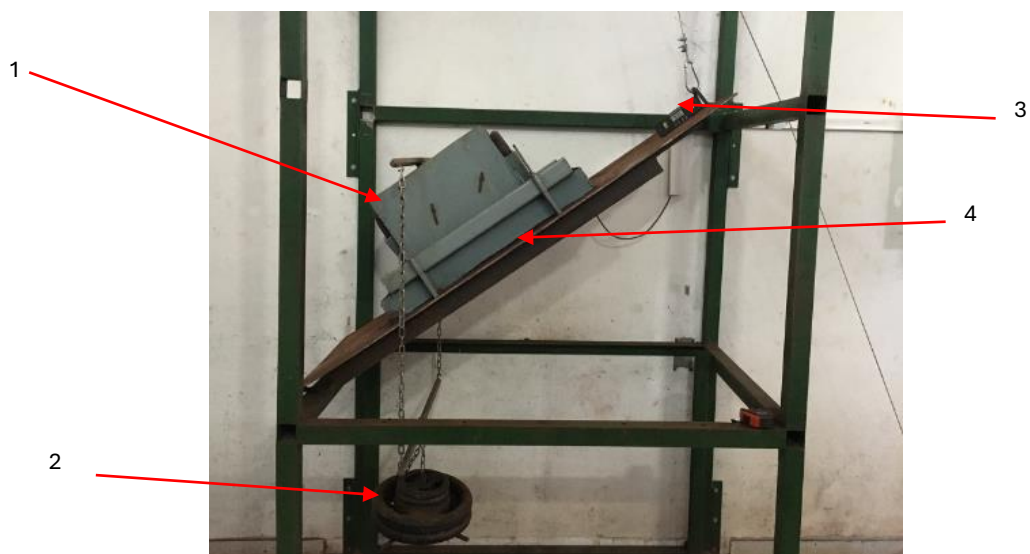
**Figura 7 – Apresentação dos mecanismos de inclinação e interrupção: (1) Sensor de interrupção; (2) Polia; (3) Inversor de Frequência; (4) Cabo; (5) Redutor; (6) Motor.**



Fonte: Autoria própria (2023).

Após a conclusão da construção dos componentes, foi realizada a montagem completa da bancada de ensaios. Em seguida, foram conduzidos os testes experimentais para validação do equipamento e avaliação de seu desempenho. A Figura 8 apresenta o projeto final da bancada, já totalmente montada e pronta para os procedimentos de teste.

**Figura 8 – Montagem final da bancada: (1) Caixa Superior; (2) Sistema de força normal; (3) Inclinômetro; (4) Caixa inferior.**

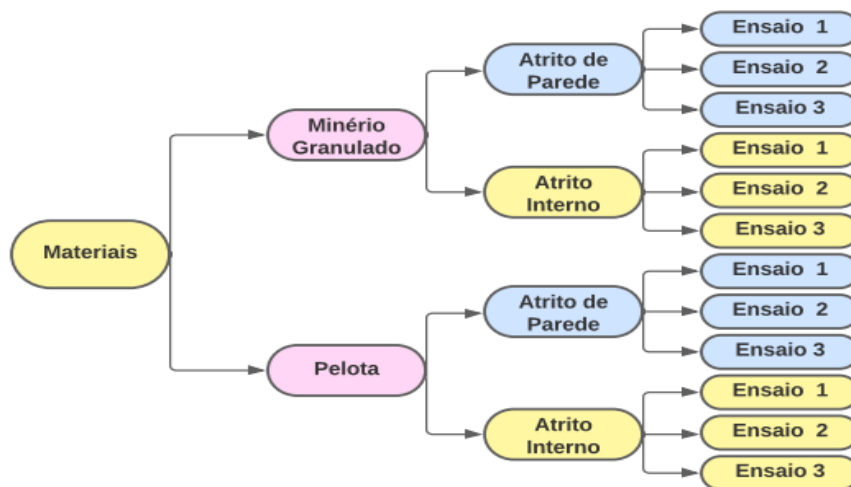


Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O ensaio foi realizado no Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados (FluidPar) da Universidade Federal do Pará - Campus Tucuruí. Os materiais utilizados nos testes foram a pelota e o minério granulado. O teste para a obtenção do ângulo de deslizamento é realizado em triplicata, ou seja, serão 3 ensaios para cada material, sendo duas configurações da máquina de ensaio, totalizando 12, como mostra o esquema da Figura 9:

Figura 9 – Diagrama de ensaios.



Fonte: Autoria própria (2023).

Primeiramente reservou-se cerca de 28 litros de cada material, que foram posteriormente inseridos em uma estufa, onde passaram por um processo de secagem ao longo de 24 horas. Após a etapa de secagem, três amostras de 1 litro de pelota e minério granulado foram pesadas, a fim de mensurar a massa específica Figura 7 (a). Com a média dos valores de massa específica foi possível calcular a quantidade de água necessária a partir dos valores de umidade crítica de cada material. A equação (1) descreve esse método:

$$m_a = \frac{u \cdot m_m}{1 - u} \quad (1)$$

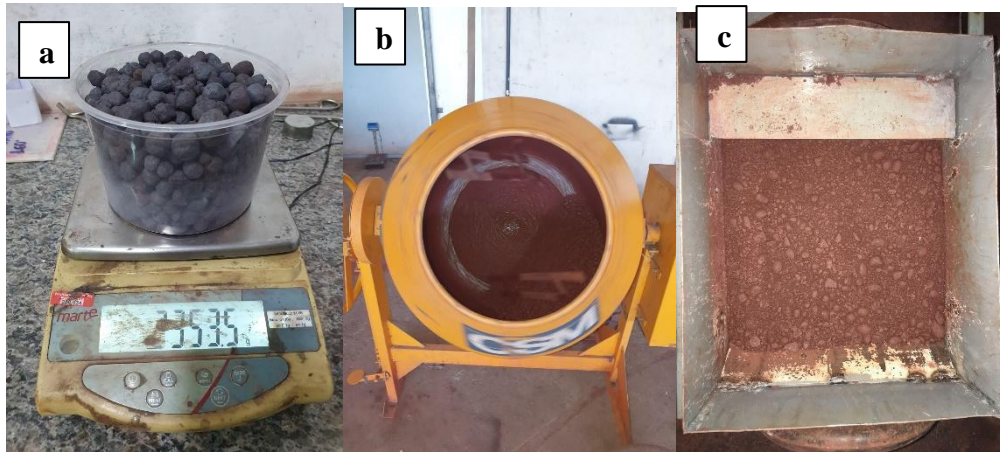
$m_a$  = a massa de água;

$u$  = umidade do material, sendo 4,6% para minério granulado e 2,5% para pelota;  $m_m$  = massa de material.

Fonte: ABNT NBR 12957-2.

Para que houvesse uma melhor difusão da água, utilizou-se uma betoneira Figura 10 (b) para realizar a mistura, foram caracterizados um total de 28 litros de amostra de ambos os materiais, para realizar os ensaios partícula-parede e partícula-partícula. O material comportado na caixa superior é ilustrado na Figura 10 (c):

**Figura 10 – Etapas do processo de umidificação das amostras.**



Fonte: Autoria própria (2023).

Já com as amostras caracterizadas deu-se início ao ensaio. Foi adicionado um total de 10 litros de material, o que corresponde aproximadamente a 80% do volume total da caixa superior, para realizar o ensaio partícula parede, onde deseja-se encontrar o coeficiente de atrito entre o granel e a parede. Em seguida foi realizado o ensaio partícula-partícula, no qual muda-se a configuração da máquina com a adição da caixa inferior, para calcular o coeficiente de atrito entre partículas. Com o minério comportado no recipiente, foi adicionado a força normal ( $F_n$ ), com um peso equivalente a 5 kPa. A rampa inclina-se através da atuação de um cabo acionado por motor e controlado por inversor de frequência a uma velocidade máxima de três graus por minuto. Quando a massa percorre o espaço de 50mm a caixa entra no range do sensor, no qual interrompe a subida da rampa através de um comando elétrico e o ângulo de escorregamento é medido. Para calcular o coeficiente de atrito é necessário conhecer outras grandezas como tensão normal, tensão cisalhante e ângulo de atrito. A tensão normal é dada pela equação 2:

$$\sigma_{n,b} = \frac{9,81 \cdot W \cos \beta}{1000A} \quad (2)$$

$\sigma_{n,b}$  = tensão normal na inclinação  $\beta$ , em kPa;

$W$  = massa de solo, pesos adicionados e qualquer parte da caixa superior não apoiada no sistema de roletes, em quilogramas;

$A$  = área, em metros quadrados;

$\beta$  = ângulo de escorregamento da caixa superior, em graus.

Fonte: ABNT NBR 12957-2.

O valor de tensão cisalhante é dado por:

$$T = \frac{9,81(W \sin \beta + F_{r(\beta)})}{1000 A} \quad (3)$$

$T$  = tensão cisalhante, em kPa;

$W$  = massa de solo, pesos adicionados e qualquer parte da caixa superior não apoiada no sistema de roletes, em quilogramas;

$\beta$  = ângulo de escorregamento da caixa superior, em graus;

$F_{r(\beta)}$  = a força requerida para reter a caixa superior vazia quando a base está inclinada a um ângulo  $\beta$ ;

$A$  = área de contato, em metros quadrados.

O ângulo de atrito é encontrado pela equação:

$$\tan \varphi_{gp} = \frac{T}{\sigma_{n,b}} \quad (4)$$

onde  $T$  = tensão cisalhante, em kPa;

$\sigma_{n,b}$  = tensão normal na inclinação  $\beta$ , em kPa.

Fonte: ABNT NBR 12957-2.

A tangente do ângulo de atrito corresponde ao coeficiente de atrito com a parede ( $\mu_w$ ), que representa um dos coeficientes necessários para o cálculo das pressões em silos:

$$\mu_w = \varphi_{gp} \quad (5)$$

Fonte: ABNT NBR 12957-2.

#### 4. RESULTADOS

As tabelas 2 e 3 apresentam os resultados dos testes de atrito realizados com pelotas e minério granulado, respectivamente, sobre uma superfície de aço carbono. Esses dados foram obtidos por meio da aplicação da metodologia do plano inclinado, utilizando corpos de prova compostos por uma composição granular. Durante os testes, o material foi submetido a uma força normal constante de 5 kPa.

**Tabela 2 – Valores encontrados para Pelota (Partícula a Parede).**

<b>Ensaio</b>	<b>Ângulos [ ° ]</b>	<b>Ângulo [Radianos]</b>	<b>Tensão Normal [kPa]</b>	<b>Tensão Cisalhante [kPa]</b>
1	24,9	0,434	4,55	2,13
2	25,2	0,439	4,54	2,16
3	25,8	0,450	4,52	2,20

Fonte: Autoria própria (2023).

**Tabela 3 – Valores encontrados para minério granulado (Partícula Parede).**

<b>Ensaio</b>	<b>Ângulos [ ° ]</b>	<b>Ângulo [Radianos]</b>	<b>Tensão Normal [kPa]</b>	<b>Tensão Cisalhante [kPa]</b>
1	25,6	0,446	4,53	2,19
2	25,3	0,443	4,54	2,16
3	25,4	0,441	4,53	2,17

Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados do ensaio entre partículas foram obtidos considerando os mesmos parâmetros do ensaio de parede. Nesse contexto, o material foi submetido a uma força normal de 5 kPa. As tabelas 4 e 5 apresentam os resultados obtidos no ensaio partícula-partícula para a pelota e o minério granulado, respectivamente.

**Tabela 4 – Valores encontrados para pelota (Entre partículas).**

<b>Ensaio</b>	<b>Ângulos [ ° ]</b>	<b>Ângulo [Radianos]</b>	<b>Tensão Normal [kPa]</b>	<b>Tensão Cisalhante [kPa]</b>
1	30,4	0,530	4,33	2,56
2	29,7	0,518	4,36	2,51

3	30,0	0,523	4,52	2,52
---	------	-------	------	------

Fonte: Autoria própria (2023).

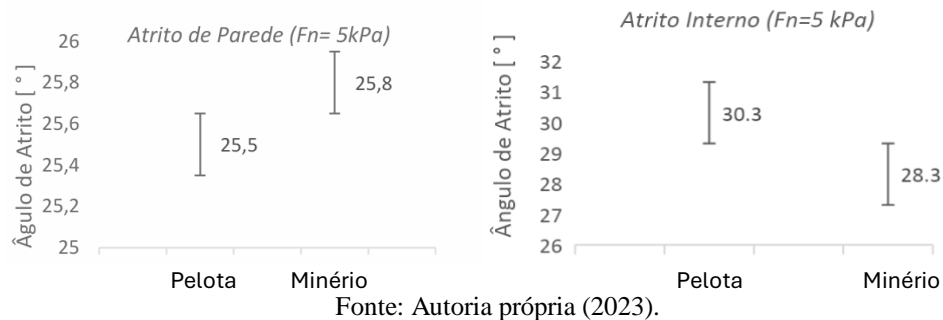
**Tabela 5 – Valores encontrados para minério granulado (entre partículas).**

Ensaio	Ângulos [ ° ]	Ângulo [Radianos]	Tensão Normal [kPa]	Tensão Cisalhante [kPa]
1	28,7	0,500	4,40	2,38
2	28,1	0,490	4,43	2,33
3	28,4	0,495	4,42	2,36

Fonte: Autoria própria (2023).

A partir dos valores obtidos, foi possível determinar tanto o ângulo de atrito para ambos, minério granulado e pelota. Esses dados estão representados nos gráficos a seguir:

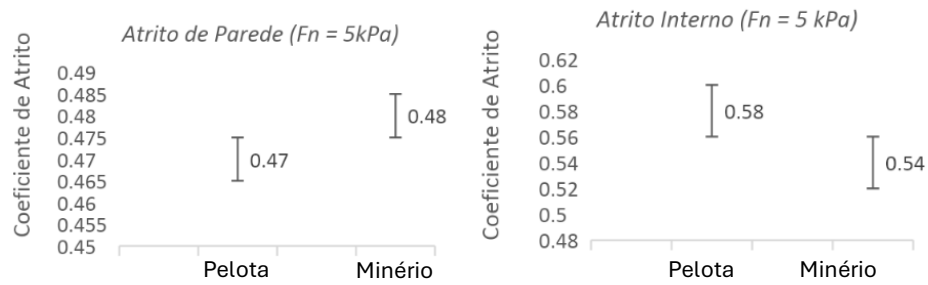
**Figura 11 – Valores de ângulos.**



Fonte: Autoria própria (2023).

Observa-se que os valores de atrito de parede para os dois materiais foram próximos. No entanto, no que diz respeito ao atrito interno, a pelota apresentou valores mais elevados, com uma média de aproximadamente dois graus a mais em comparação com o minério granulado.

Após encontrar os valores dos ângulos, foi possível determinar os coeficientes de atrito de parede para cada material. Conforme mencionado anteriormente, foram aproximadamente 25,5° para pelota e 25,8° minério granulado. Já os valores de atrito interno foram 30,3° e 28,3° para pelota e minério granulado, respectivamente. Ambos resultados foram mensurados considerando como parâmetro a unidade, no qual é responsável por dar maior resistência a escoamento.

**Figura 12 – Valores de coeficiente de atrito.**

Fonte: Autoria própria (2023).

O coeficiente de atrito de parede, com valores de 0,47 para a pelota e 0,48 para o minério granulado, representa a resistência ao deslizamento nas superfícies de contato com as paredes do sistema. Esses valores refletem a magnitude da força de atrito tangencial exercida entre o material granular e as superfícies sólidas, evidenciando a influência das propriedades físicas na interação macroscópica.

Por sua vez, os coeficientes de atrito interno, medidos em 0,58 para a pelota e 0,54 para o minério granulado, referem-se às forças de atrito existentes no interior do próprio material. Esse parâmetro caracteriza a resistência ao escoamento interno, indicando a capacidade do material de superar sua coesão interna e fluir sob condições específicas. Tais valores são fundamentais para entender o comportamento de escoabilidade e planejar soluções otimizadas em sistemas de armazenamento e transporte de grânéis.

Barrios (2013) obtiveram experimentalmente parâmetros de contato para manuseio de pelotas de minério de ferro, os resultados estão listados na Figura 11:

**Figura 13 – Valores de coeficientes de atrito.**

Parameter	Pellet model	Contact type	
		Pellet-steel	Pellet-pellet
Coefficient of static friction	-	0.50	0.49
Coefficient of rolling friction	Sphere	0.25	0.21
	Overlapping spheres	0.01	0.02
Coefficient of restitution	Sphere	0.39	0.48
	Overlapping spheres	0.42	0.51

Fonte: Barrios et al. 2013 (Adaptado).

Verifica-se que o coeficiente de atrito de parede apresenta um valor de 0,5, aproximadamente 0,03 unidades superiores ao resultado obtido no presente estudo. Em relação ao coeficiente de atrito interno, foi mensurado um valor de 0,49, enquanto o artigo em análise registra um valor de 0,58, representando uma diferença de aproximadamente 0,09 unidades a mais. Esses dados evidenciam variações entre os coeficientes, refletindo as particularidades dos materiais e das condições experimentais utilizadas. A obtenção de valores experimentais próximos aos reportados na literatura evidencia a eficácia da bancada desenvolvida, demonstrando sua capacidade de gerar resultados confiáveis e consistentes para a análise das propriedades de atrito em materiais granulares.

As condições experimentais de Barrios et al. (2013) envolveram uma série de testes conduzidos com pelotas de minério de ferro produzidas industrialmente, com o objetivo de estimar parâmetros físicos e de contato para uso em simulações pelo Método dos Elementos Discretos (DEM). As pelotas, com tamanhos entre 8 e 19 mm (mediana de 12,3 mm), foram analisadas individualmente em diferentes ensaios: a densidade foi obtida por picnometria; a forma foi caracterizada por imagens 2D, medindo esfericidade e razão de aspecto; o módulo de cisalhamento foi estimado a partir de testes de impacto em célula de carga, baseando-se na energia e força de fratura. Para os parâmetros de contato, utilizou-se um tribômetro rotacional (pin-on-disk) para medir o coeficiente de atrito estático entre diferentes pares de materiais (pelota-pelota, pelota-aço, pelota-borracha).

## 5. CONCLUSÕES

Foi possível desenvolver uma bancada de ensaios destinada a mensurar as características físicas de materiais granulares por meio de um plano inclinado, atingindo o objetivo principal do estudo. A construção seguiu os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR ISO 12957-2, garantindo a confiabilidade e precisão dos experimentos realizados.

A bancada permitiu a realização de testes para determinar os ângulos de atrito interno e atrito de parede, demonstrando a eficácia da metodologia do plano inclinado na obtenção desses parâmetros. Os valores experimentais foram comparados com referências da literatura e apresentaram resultados próximos, validando a confiabilidade da estrutura desenvolvida. Variações foram observadas, atribuídas a diferenças nas condições experimentais, mas sem comprometer a precisão dos dados obtidos.

Com base nos resultados apresentados, todos os objetivos específicos foram alcançados, possibilitando a determinação de grandezas fundamentais para o estudo do comportamento de materiais granulares em condições de deslizamento. A bancada desenvolvida demonstrou ser uma ferramenta confiável para estudos futuros, permitindo a ampliação das investigações sobre as propriedades mecânicas de materiais granulares, com aplicações tanto na engenharia quanto na indústria.

Dessa forma, o presente estudo contribui para o aprimoramento de técnicas de análise de atrito em materiais granulares, podendo ser utilizado como referência para futuras pesquisas e melhorias no setor de mineração, armazenamento e transporte de sólidos particulados.

## **RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

- Dimensionar um novo sistema de inclinação;
- Construir uma nova caixa superior com materiais mais robustos;
- Realizar ensaios com diferentes materiais e diferentes valores de tensão;
- Avaliar a influência considerando variações de umidades, e rugosidades das superfícies de contato.

## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 12957 Geossintéticos — Determinação das características de atrito Parte 2: Ensaio de plano inclinado, 2013.
- ANDREOTTI, B.; FORTERRE, Y.; POULIQUEN, O. Granular media: between fluid and solid. [S.l.]: Cambridge University Press, 2013.
- MEHTA, A. Granular physics. [S.l.]: Cambridge University Press, 2007.
- DURAN, J. Sands, powders, and grains: an introduction to the physics of granular materials. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- PALMA, G. Pressões e fluxo em silos esbeltos ( $h/d > 1,5$ ). Escola de Engenharia de São Carlos. USP, São Carlos, 2005.
- SADOVSKAYA O.; SADOVSKII V. Mathematical Modeling in Mechanics of Granular Materials. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- GROGER, T.; TUZUN, U.; HEYES, D. M. (2003). Modelling and measuring of cohesion in wet granular materials, Powder Technology, 133 (1-3), 203-215
- KLEPPNER, D.; KOLENKOW, R. *Introduction to Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- NAKA, S. Determinação das propriedades físicas dos grãos de mamona ‘guarani’ visando armazenagem em silos verticais. Universidade Estadual de Campinas – SP, (2010).
- MITARAI, N.; NORI, F. Wet granular materials, Advances in Physics, 55:1-2, 1-45 (2006).
- GRIMA, A. P., MILLS, B. P. WYPYCH, P. W. (2010). Investigation of Measuring Wall Friction on a Large-Scale Wall Friction Tester and the Jenike Direct Shear Tester. 3rd International conference exhibition BulkSolids Europe 2010 (pp. 1-14).
- NASCIMENTO, F. C. A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados: o parâmetro K. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- BARRIOS, G. K. P., de CARVALHO, R. M., KWAVE, A., TAVARES, L. M. (2013). Contact parameter estimation for DEM simulation of iron or pellet handling. Power Technology, 248, 84-93. Doi:10.1016/j.powtec.2013.01.063.
- CALIL JR, C. Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais. Tese (Livre Docência), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990. 185p.
- ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Faturamento do setor da mineração cresce 36% em 2020. Disponível em: <https://www.abmbrasil.com.br>. Acesso em: 31 mar. 2021.

VALE. Conheça mais sobre a história de Carajás, a maior mina de minério de ferro do mundo. Disponível em: <http://www.vale.com>. Acesso em: 19 mar. 2021.

COMEXSTAT. Pará: Exportação de Minério de Ferro. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br>. Acesso em: 03 abr. 2021.

FUERSTENAU, M. C.; HAN, K. N. Principles of Mineral Processing. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2003.

LU, L. Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. Elsevier, 2015.

PIETSCH, W. Agglomeration Processes: Phenomena, Technologies, Equipment. 2001.

YOVANOVIC, A. P. Introdução à Engenharia de Cominuição. CETEM, 2003.

BAIA, Danielle Vitória et al. *Obtenção do Coeficiente de Atrito de Parede de Materiais Granulares Através da Mesa de Cisalhamento*. Trabalho apresentado no XII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Natal, RN, Brasil, 29 de julho a 2 de agosto de 2024.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física – Volume 1*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

FEYNMAN, R. P. *Lições de Física de Feynman – Volume 1: Mecânica, Radiação e Calor*. Tradução brasileira. Rio de Janeiro: [Editora], 2010.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica – Volume 1*. 4. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2007.