

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EVANILDO BRANDÃO BATISTA

**OTIMIZAÇÃO DO ÂNGULO DE ESCORREGAMENTO DE MATERIAL
PARTICULADO EM CAÇAMBAS BASCULANTES CONSIDERANDO O TIPO E
CONDIÇÕES GRANUMÉTRICAS DO MATERIAL E REVESTIMENTO INTERNO
DA CAÇAMBA**

SANTOS/SP
Julho/2023

EVANILDO BRANDÃO BATISTA

**ÂNGULO DE ESCORREGAMENTO DE MATERIAL PARTICULADO EM
CAÇAMBAS BASCULANTES**

Dissertação apresentada a Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior

SANTOS/SP

Julho/2023

Dedico este trabalho à Deus, pelo dom da vida e por ter permitido que eu concluísse esse estudo. Aos meus pais, Antonio (*in memoriam*) e Elza pelos princípios que me ensinaram e pela educação que me proporcionaram, ao meu irmão Agnaldo pelo suporte familiar, agradeço profundamente a minha esposa Fabiana, que sempre me apoiou em meus estudos e trabalhos nesta longa jornada, e as minhas filhas, Maria Alice e Cecília, que me motivam a buscar uma vida melhor e com mais sabedoria e força de vontade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente à Deus e a Mãe Três Vezes Admirável de Schoenstatt pelo dom da vida e por toda inspiração de sabedoria e discernimento na realização deste trabalho.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior, pelos ensinamentos, amizade e paciência ao longo dessa jornada na realização desse mestrado.

Aos professores do Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Santa Cecília, e em especial ao Prof. Dr. Vitor da Silva Rosa pelas contribuições valiosas na minha formação.

Aos técnicos do Laboratório de Operações Unitárias, Álvaro Luiz Moreira Conrado, Volnei de Lemos e Irineu Penha da Ressurreição, pela montagem da unidade experimental e sugestões.

Aos meus colegas e amigos de trabalho do Senai, Etec Getúlio Vargas e Centro Paula Souza – Cetec, pelos ensinamentos e incentivos na realização desse mestrado.

À Universidade Santa Cecília pela oportunidade e infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

E finalmente a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para o desenvolvimento deste trabalho, enriquecendo o meu estudo.

Cumpra-se a cada instante o que previste para nós. Temos um único anseio: conduze-nos segundo teus sábios planos. Paire ante nosso olhar e forme toda a nossa vida o ideal para o qual teu amor nos criou, nele concentremos toda a força.

(Padre José Kentenich)

RESUMO

A utilização de caminhões basculantes no transporte de materiais sólidos é considerada uma eficiente alternativa utilizada pelas indústrias, porém esse tipo de transporte oferece riscos ao se realizar o descarregamento da carga contida na sua caçamba. Pode ocorrer acidentes acarretando danos tanto físicos como materiais devido a diversidade de fatores que levam ao tombamento da caçamba durante o procedimento de inclinação. A determinação da aderência do revestimento interno da caçamba de caminhão relacionando com o ângulo de inclinação do basculamento no momento do escorregamento dos materiais sólidos particulados é algo de grande valia para os diversos segmentos envolvidos nesta operação. A literatura é escassa quanto a informações que relacionam o revestimento da caçamba com a inclinação necessária para o descarregamento total da carga. O presente trabalho teve como objetivo determinar experimentalmente o ângulo de descarregamento completo do minério de ferro e areia seca grossa e fina em caçambas basculantes em relação ao seu revestimento interno. Para tal, ao longo deste trabalho foram desenvolvidas três unidades experimentais com o intuito de simular o basculamento. As unidades experimentais consistiram em três caçambas de 250 mm de comprimento, 88 mm de largura e 100 mm de altura, com revestimentos metálico, em tinta automotiva e de madeira. A simulação do basculamento se deu por meio de uma plataforma elevatória automática, onde acoplou-se as caçambas, sendo as cargas estudadas em 3 diferentes alturas – 30, 60 e 90mm. As cargas utilizadas foram areia grossa, areia fina e minério de ferro. O método empregado consistiu na alimentação das cargas nas 3 caçambas e nas 3 alturas a fim de se realizar o seu descarregamento máximo, sem que houvesse solavancos, por meio do aumento constante da inclinação da caçamba. Obteve-se menores ângulos de inclinação e massa retida na caçamba de aço revestido com tinta automotiva, enquanto a caçamba de madeira demonstrou o pior desempenho para todas as cargas e alturas estudadas. Conclui-se que o ângulo de inclinação para o descarregamento total da carga tende a ser menor com o aumento da quantidade de material na caçamba, e que o revestimento aplicado à caçamba exerce uma interação significativa no escorregamento da carga afetado pela rugosidade do revestimento.

Palavras-chave: Materiais granulares. Caçamba de caminhão. Fluxo granular. Caminhões basculantes.

ABSTRACT

The use of dump trucks to transport solid materials is considered an efficient alternative used by industries, but this type of transport poses risks when unloading the load contained in its bucket. Accidents can occur causing both physical and material damage due to the diversity of factors that lead to the bucket tipping over during the tilting procedure. Determining the adherence of the internal lining of the truck bed in relation to the angle of inclination of the tipping when the solid particulate materials slip is something of great value for the various segments involved in this operation. The literature is scarce in terms of information relating the bucket liner to the necessary inclination for the complete unloading of the load. The objective of this work was to experimentally determine the complete unloading angle of iron ore and coarse and fine dry sand in tipping buckets in relation to their internal lining. For this purpose, throughout this work, three experimental units were developed in order to simulate tipping. The experimental units consisted of three buckets measuring 250 mm in length, 88 mm in width and 100 mm in height, with metallic coatings, automotive paint and wood. The tipping simulation was carried out using an automatic lifting platform, where the buckets were coupled, and the loads studied at 3 different heights – 30, 60 and 90mm. The fillers used were coarse sand, fine sand and iron ore. The method employed consisted of feeding the loads into the 3 buckets and at the 3 heights in order to perform their maximum unloading, without any jolts, by constantly increasing the inclination of the bucket. Smaller angles of inclination and retained mass were obtained in the steel bucket coated with automotive paint, while the wooden bucket showed the worst performance for all loads and heights studied. It is concluded that the angle of inclination for the total discharge of the load tends to be smaller with the increase of the amount of material in the bucket, and that the coating applied to the bucket exerts a significant interaction in the sliding of the load affected by the roughness of the coating.

Keywords: Granular materials. Truck bucket. Granular flow. Tipper trucks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Caminhão basculante	12
Figura 2 – Tombamento do caminhão durante o basculamento	17
Figura 3 – Metodologias utilizadas para a medição do ângulo de repouso	21
Figura 4 - Fotografias de partículas de materiais testados mostrando suas diferentes formas.....	23
Figura 5 – Método de inclinação de caixa para medição do coeficiente de atrito estático	25
Figura 6 – Métodos de medições para caracterizar as propriedades macroscópicas de materiais granulares.....	26
Figura 7 – Tipos de escoamento	31
Figura 8 – Unidade experimental da unidade piloto do sistema de descarregamento de um caminhão basculante projetado no laboratório de Operações Unitárias da Unisanta.....	34
Figura 9 – Materiais estudados: a) Minério de ferro; b) Areia fina; c) Areia grossa...	35
Figura 10 - Caçambas. 10.a) Caçamba de madeira MDF; b) Caçamba de aço carbono lixado; c)Caçamba de aço carbono revestido com tinta automotiva.....	35
Figura 11 – Suporte das caçambas.....	36
Figura 12 – Motor elétrico	37
Figura 13 – Fuso roscado	37
Figura 14 – Painel de controle.....	38
Figura 15 – Planejamento experimental.....	39
Figura 16 – Equipamento de medição da rugosidade	40
Figura 17 - Média das triplicatas dos ângulos de inclinação em função das caçambas para altura de 30mm. Sendo, 1 a caçamba de madeira, 2 a caçamba de aço sem revestimento e 3 a caçamba de aço revestido com tinta	43
Figura 18 - Média das triplicatas dos ângulos de inclinação em função das caçambas para altura de 60mm. Sendo, 1 a caçamba de madeira, 2 a caçamba de aço sem revestimento e 3 a caçamba de aço revestido com tinta	43

- Figura 19 - Média das triplicatas dos ângulos de inclinação em função das caçambas para altura de 90mm. Sendo, 1 a caçamba de madeira, 2 a caçamba d sem revestimento e 3 a caçamba de aço revestido com tinta44
- Figura 20: Média das triplicatas dos ângulos de inclinação em função das caçambas para o minério de ferro. Sendo, 1 a caçamba de madeira, 2 a caçamba de sem revestimento e 3 a caçamba de aço revestido com tinta45
- Figura 21: Média das triplicatas dos ângulos de inclinação em função das caçambas para areia grossa. Sendo, 1 a caçamba de madeira, 2 a caçamba de aço sem revestimento e 3 a caçamba de aço revestido com tinta45
- Figura 22: Média das triplicatas dos ângulos de inclinação em função das caçambas para areia fina. Sendo, 1 a caçamba de madeira, 2 a caçamba de aço sem revestimento e 3 a caçamba de aço revestido com tinta46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ângulo de repouso dos materiais	32
Tabela 2 – Características das partículas e fatores que afetam a escoabilidade de pós	33
Tabela 3 – Resultados da medição de rugosidade	40
Tabela 4 – Dados dos experimentos do ângulo de repouso estático	41
Tabela 5 – Resultado médio das triplicatas.....	41
Tabela 6 – Material retido.....	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivo	14
1.2 Objetivos específicos	14
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	16
2.1 Materiais granulares.....	16
2.2 Indicadores de fluidez dos pós	18
2.2.1 Medições de resistência ao cisalhamento	19
2.2.2 Medições de densidade.....	19
2.2.3 Ângulo de repouso	21
2.3 Coesão e adesão entre partículas.....	27
2.3.1 Índice de Hausner	28
2.4 Propriedades do pó que afetam a fluidez.....	29
2.5 Escoamento de materiais sólidos.....	30
3 MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 Suporte da caçamba	36
3.2 Motor elétrico.....	36
3.3 Fuso roscado.....	37
3.4 Painel de controle.....	38
3.5 Planejamento experimental.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1 Rugosidade da superfície dos revestimentos das caçambas.....	40
4.2 Ângulo de repouso	41
4.3 Graus de Inclinação	41
4.4 Material retido na caçamba	47
5 CONCLUSÃO	49
5.1 Sugestões	49
REFERÊNCIAS	
APÊNDICE A1 - Artigo Publicado	
APÊNDICE A2 – Dados obtidos no experimento	
ANEXO A	

1 INTRODUÇÃO

Os materiais particulados são aplicados nas diversas atividades da humanidade e, especificamente, nas atividades ligadas à mineração, manuseio e transporte de sólidos granulares. Uma grande quantidade dos materiais manufaturados na indústria química, metalurgia, farmacêutica, e indústrias de processamento de alimentos são sólidos granulados.

Esses materiais sólidos particulados tais como areia, brita, minério e graneis no geral, são na maioria das vezes transportados por caminhões basculantes que tem como característica principal o descarregamento dessa carga através da inclinação da sua caçamba e dessa maneira o material desliza através do efeito gravitacional.

Um caminhão basculante é apresentado na Figura 1, sendo que o mesmo é equipado com uma caçamba aberta articulado em sua traseira. O sistema de acionamento dispõe de um ou alguns cilindros hidráulicos que avançam em seu curso, dando início a inclinação da caçamba e, conseqüentemente, o escorregamento da carga.



Figura 1 - Caminhão basculante.
Fonte: PORTAL GOVERNO, 2023.

O caminhão basculante é um tipo específico de veículo equipado com uma caçamba articulada na parte traseira com capacidade de erguer a sua carroceria para que a carga transportada seja descarregada por meio da ação da gravidade. O principal atributo do caminhão basculante é a sua capacidade de erguer a carroceria metálica articulada. Esse processo acontece com a ação de sistemas hidráulicos que usam a força do motor para bombear o óleo e acionar o pistão. Esse, por sua vez, é acionado para erguer e recolher a sua carroceria.

Nos veículos modernos, o basculamento é realizado de forma rápida, a partir da ativação do botão da tomada de força dentro da própria cabine. O caminhão basculante é composto de uma estrutura metálica rígida, capaz de acondicionar uma quantidade alta de material sem ultrapassar as laterais da caçamba. Esse atributo é um grande diferencial do veículo, uma vez que torna o transporte mais seguro, impedindo que resíduos caiam ou sejam levados com a força do vento devido à carroceria.

Para Jaworski (2015), os caminhões basculantes se diferenciam dos caminhões comuns devido à necessidade que têm de possuírem um chassi mais curto, mais reforçado e de terem uma tomada de força acoplada ao sistema de transmissão a qual é acionada da própria cabine. A tomada de força irá movimentar uma bomba de óleo que acionará os êmbolos hidráulicos do sistema de levantamento da caçamba. Esse tipo de caminhão pode ser classificado como basculantes para pedras e basculantes para britas, areias e argilas. No primeiro caso as caçambas são feitas com chapas grossas e perfiladas de reforço, e são destituídas de tampa traseira, pois o impacto das pedras poderia danificá-la.

O transporte rodoviário tornou-se predominante no Brasil principalmente pelo modelo implantado pelo governo brasileiro na década de cinquenta, que priorizava aberturas de estradas (HENRIQUE; CORDEIRO; RIBEIRO, 2011).

Existem vários problemas relacionados ao transporte de cargas no Brasil, porém, o que chama atenção é a distribuição desigual da matriz de transporte no país. É bom lembrar que no Brasil o modo predominante na rede de transporte de carga é o rodoviário, com uma participação de 67,6%, seguidas por ferrovias (21,5%), hidrovias (9,4%), dutoviárias (1,4%) e aéreas (0,1%) (PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA, 2021).

Toda essa frota em um determinado momento vai precisar descarregar a sua carga e quando se tratar de sólidos particulados surge uma dificuldade, o material pode ter dificuldade de escorregar da caçamba do caminhão.

No momento do descarregamento do material sólido particulado da caçamba do caminhão podem ocorrer acidentes como tombamento do veículo devido a aderência do material na caçamba, excesso de carga e a falta de capacitação do motorista do caminhão.

Isso demonstra que esse estudo de ângulo de escorregamento de material particulado na caçamba de caminhão necessita de mais pesquisas e conhecimentos de engenharia para que possam ser desenvolvidos sistemas de revestimentos em caçambas mais eficientes para o escorregamento da carga e que ofereçam segurança na operação de basculamento.

Segundo Carr, Roberts e Wheeler (2019) no campo do manuseio de materiais a granel, a adesão pode ser definida como a força de tração para os contatos partícula-partícula e partícula-parede do material a granel.

A influência do revestimento da caçamba do caminhão constitui a diferença entre o sucesso e o fracasso da operação de descarregamento do sólido particulado da caçamba do caminhão. A aderência da massa de material que fica nas superfícies da caçamba basculante normalmente é problemática.

São poucos os dados na literatura referente ao ângulo de escorregamento de material particulado na caçamba de caminhão.

1.1 Objetivo

O objetivo principal do presente trabalho foi determinar experimentalmente o ângulo de descarregamento completo do minério de ferro e da areia seca grossa e fina em caçambas basculantes em escala de bancada em relação ao seu revestimento interno.

1.2 Objetivos específicos

a) Realizar a classificação granulométrica dos materiais sólidos empregados como carga por meio da utilização de peneiras com diferentes aberturas;

b) Comparar o desempenho entre as caçambas utilizadas (madeira, aço e aço revestido com tinta automotiva), para cada material analisado (areia, areia fina e areia grossa);

c) Avaliar a variação de massa retida na caçamba em função do ângulo de escorregamento.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Existem muitas indústrias que utilizam materiais particulados, tais como: farmacêuticas, as de cerâmicas, as alimentícias, as de cimento, assim como as de mineração, entre outras. Atualmente são necessários mais estudos e melhorias para otimizar e facilitar o processo de manuseio e fabricação de materiais particulados. Tais melhorias dependem da elucidação das várias propriedades e comportamento mecânico desses materiais.

2.1 Materiais granulares

O material primário utilizado na indústria é fluido, o segundo material mais utilizado é de natureza granular. O material granular é um aglomerado de partículas distintas que perdem energia ao interagir com outras partículas. Habitualmente, o tamanho da partícula determina se um material é considerado granular. Conforme Popov et al. (1996), o tamanho mínimo de partícula do material granular é de 1 μm , e materiais com tamanho de partícula menor podem estar sujeitos a oscilações de movimento térmico.

Os materiais granulares são produzidos através de vários processos de granulação (por exemplo, secagem por pulverização, secagem por pulverização em leito fluidizado ou granulação em tambor) (LUMAY et al., 2012). O processo de granulação altera a morfologia macroscópica agrupando partículas individuais em grânulos esféricos maiores, conseqüentemente, aumentando a fluidez. No campo do manuseio de materiais a granel, a adesão pode ser definida como a força de tração para os contatos partícula-partícula e partícula-parede do material a granel (CARR, ROBERTS, WHEELER, 2019).

A abundância de materiais granulares e pós que estão sendo usados em diversos campos, juntamente com suas amplas aplicações, requer uma compreensão abrangente de seu comportamento macro e micromecânico (AL-HASHEMI, AL-AMOUDI, 2018).

Normalmente, os caminhões basculantes são os responsáveis para transportar os materiais granulares pesados, como cascalho, areia, terra, grãos, além de outros materiais. Esse tipo de caminhão tem como vantagem a versatilidade no transporte

de cargas variadas desde sólidos granulares a madeira, detritos e resíduos secos, praticidade no descarregamento que ocorre sem a necessidade de outras máquinas ou trabalhadores e também por ter um custo menor.

Contudo, a operação de basculamento pode ocasionar acidentes acarretando danos tanto físicos como materiais devido a diversidade de fatores que levam ao tombamento da caçamba durante o procedimento de inclinação, como se observa na Figura 2.



Figura 2 – Tombamento do caminhão durante o basculamento.
Fonte: BRUSQUE, 2021.

Dentre estes fatores, destacam-se: a) cabine e carroceria não alinhados; b) a realização do basculamento em terrenos desnivelados; c) pneus abaixo da calibração adequada, que podem fazer com que a carroceria penda para o seu lado; d) a má distribuição da carga, que faz com que o baricentro do caminhão seja alterado; e) excesso de carga; f) movimentação do caminhão durante a inclinação; g) condições meteorológicas desfavoráveis, como ventos fortes; h) retenção da carga na caçamba devido a sua umidade e i) solavancos propositais com a intenção de soltar cargas retidas.

A rugosidade da superfície da caçamba e a quantidade de material sendo transportado são fatores que podem contribuir com a aderência da carga na caçamba, portanto, um revestimento mais adequado para as caçambas de caminhões

certamente faria com que danos físicos e materiais fossem evitados. Segundo Batista et al. (2023), projetar adequadamente e desenvolver um sistema de revestimento melhor é importante para evitar possíveis tombamentos, diminuir o tempo de descarregamento possibilitando uma otimização na operação.

2.2 Indicadores de fluidez dos pós

Em seus estudos, Lu et al (2023) definiram o pó sendo um agregado composto por um número grande de pequenas partículas: sólidos na forma de partículas; gás, geralmente na forma de ar entre as partículas; e água, seja na superfície da partícula ou dentro de sua estrutura. A interação dessas fases contribui para a mudança da fluidez das partículas. A fluidez também depende das propriedades do particulado (teor de umidade, densidade, composição, forma e distribuição do tamanho das partículas), algumas das quais podem mudar como resultado do impacto durante o manuseio, umidade relativa do ar, temperatura e condições de tempo de armazenamento (BHOPLÉ, KUMAR, HALDKAR, 2017).

Pós ou materiais granulares podem ser produzidos com diferentes propriedades físicas. As medições das propriedades físicas são importantes porque ajudam a definir o pó e afetam intrinsecamente suas propriedades durante o armazenamento, manuseio e processamento. O comportamento do fluxo de pós é um fenômeno complexo no qual as propriedades físicas e químicas das partículas de pó estão envolvidas (JUAREZ-ENRIQUEZ et. al., 2022). Propriedades de fluxo, como o ângulo de atrito interno, coesão, ângulo de repouso, Razão de Hausner e densidade aparente têm sido usadas como descrições qualitativas da fluidez de alimentos em pó (JULIANO, MUHUNTHAN, GUSTAVO, 2006).

Prescott e Barnum (2000) indicaram que a fluidez do pó é um resultado combinado da influência das propriedades físicas do material e do equipamento usado para manusear, armazenar ou processar o material. A medição da resistência ao cisalhamento, a medição da densidade e a medição do ângulo de repouso são algumas das técnicas comuns usadas para estabelecer a fluidez potencial de materiais em pó.

2.2.1 Medições de resistência ao cisalhamento

De acordo com Bell (1999), os silos de armazenamento ou tremonhas foram historicamente projetados em grande parte por adivinhação, até a pesquisa de Janssen em 1895, seguida pela de Jenike em 1964. A teoria de Jenike, baseada na resistência ao cisalhamento do material, continua sendo a base para determinar a fluidez do pó, o projeto de silos para fluxo de massa e o dimensionamento das saídas do silo para evitar arcos. A resistência ao cisalhamento é a resistência de um material a granel contra falha ou fluxo. (JENIKE, 1964).

O fator de fluxo Jenike é obtido usando uma célula de cisalhamento Jenike, que mede a variação na tensão de cisalhamento necessária para produzir fluxo com mudanças na tensão normal em materiais a granel.

De acordo com Bell (1999), os métodos de teste de cisalhamento de Jenike provaram ser válidos e reprodutíveis para uma ampla gama de pós. A célula de cisalhamento Jenike fornece medições das propriedades coesivas do pó que podem ser usadas para projetar uma tremonha para evitar arqueamento e formação de buracos (BEHERA et al., 2002). Eles usaram a célula de cisalhamento Jenike para obter o diâmetro mínimo crítico de saída do funil e o meio ângulo do funil para o projeto de um funil de fluxo de massa para cinco materiais a granel diferentes. Descobriram que o diâmetro de abertura do funil precisava ser maior para pós coesivos devido à maior coesão e funções de fluxo mais baixas desses pós. No entanto, foi relatado que a aplicação desta análise pode ocasionalmente produzir valores inesperados para o tamanho da abertura da tremonha (FITZPATRICK, BARRINGER, IQBAL, 2004).

Além disso, este procedimento é demorado e requer várias centenas de gramas de produto de alto valor potencial, e os resultados dependem das habilidades do operador (BELL, 1999).

2.2.2 Medições de densidade

Muitos processos químicos envolvem lidar com pós secos, como matérias-primas, intermediários ou produtos finais, tornando a previsão das características de fluxo de grande preocupação no manuseio de sólidos a granel.

Existem diversas maneiras pelas quais a fluidez do pó pode ser descrita, através da utilização dos diferentes métodos de medições disponíveis (BELL, 2001; FITZPATRICK, AHRNE, 2005). Estas são basicamente técnicas aeradas e não aeradas. No entanto, se houver um estado de quebra, bloqueio de fluxo ou outro mau funcionamento da produção, os pós podem mudar instantaneamente para um estado não aerado. Além disso, durante o período de armazenamento em uma tremonha ou torre de armazenamento, todos os pós estão em um estado não aerado.

A densidade aparente de um pó é a sua massa dividida pelo volume ocupado pelo pó. Também é referido como a massa de pó que pode ser embalada em um volume específico. O volume inclui os espaços entre as partículas, bem como os volumes do envelope das próprias partículas. A densidade aparente de um pó muda tremendamente dependendo da forma como as partículas são empacotadas, se ele for compactado, forçando-se a acomodação das partículas, a medida aferida será densidade aparente compactada. Portanto, não há uma constante para um determinado pó (EMERY et al., 2009).

Existem dois métodos básicos de avaliação da densidade aparente de um pó que fornecem um guia para suas características de fluxo. A densidade aparente aerada (material solto no recipiente) de um pó é determinada permitindo que o pó disperso assente em um recipiente sob a influência da gravidade. Porém a densidade aparente compactada ocorre quando o material é compactado, forçando-se a acomodação das partículas do pó.

Svarovsky (1987) definiu a densidade aerada como a densidade medida quando as partículas são separadas umas das outras por uma película de ar e que, em geral, não estão em contato direto umas com as outras. No entanto, a maioria dos trabalhadores a interpreta como a densidade a granel depois que o pó foi aerado e deixado assentar suavemente, o que significa a densidade a granel mais frouxamente compactada.

A densidade aparente compactada (embalagem densa aleatória) é obtida batendo no recipiente que contém a amostra aerada. A estrutura de um pó coesivo entrará em colapso significativamente ao bater, enquanto o pó fraco ou de fluxo livre tem pouco espaço para consolidação adicional. As partículas de pó são forçadas a pular e perder contato umas com as outras por um momento enquanto batem. Quando

há atrito reduzido entre as partículas, elas se reorganizam e, assim, o batimento resulta em melhores condições de empacotamento (SEVILLE, TÜZÜN, CLIFT, 1997).

A relação entre a densidade aparente compactada e a densidade aparente aerada é chamada de razão de Hausner, um termo cunhado por Gray e Beddow (1968), que é uma medida útil de coesão. Dutta e Dullea (1990) consideraram uma queda na razão de Hausner como uma diminuição na coesividade do pó.

2.2.3 Ângulo de repouso

O ângulo de repouso é considerado um parâmetro característico de pós e materiais granulares. É definido como o ângulo de inclinação da superfície livre para a horizontal de uma pilha de granéis sólidos, sendo um critério para a fluidez de um pó e um parâmetro fundamental no armazenamento de material a granel (CHENG, ZHAO, 2017).

Geralmente, o ângulo de repouso é um parâmetro fácil de se medir e fornece uma estimativa aproximada do comportamento coesivo dos pós. No entanto, segundo Dury et al. (1998), para poder comparar os resultados de diferentes estudos, o método de medição e as ferramentas devem ser padronizados.

Mostra-se na Figura 3 o método de medição que consiste na formação do monte cônico com a utilização de um funil, que é o tipo mais utilizado para a determinação do ângulo de repouso, e também os dois tipos de cilindros que podem ser utilizados para medição.

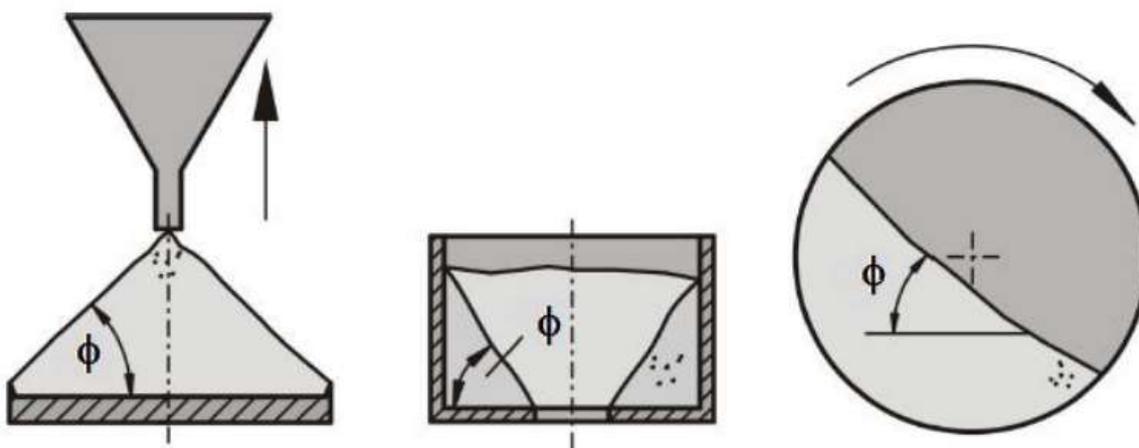


Figura 3 – Metodologias utilizadas para a medição do ângulo de repouso.

Fonte: Schulze, 2010.

De acordo com Kalman (2021), tanto o ângulo de repouso quanto o ângulo de inclinação podem ser definidos pelas funções de número de Arquimedes, mas cada material tem parâmetros empíricos diferentes.

Quando partículas são derramadas sobre uma superfície plana, uma pilha cônica é formada e o ângulo entre a altura inclinada e a base do cone é conhecido como ângulo de repouso (CHUKWU, AKANDE, 2007). Uma das definições mais comumente usadas do ângulo de repouso é a maior inclinação do material não confinado, medida a partir do plano horizontal no qual o material pode ser empilhado sem entrar em colapso.

O ângulo de repouso pertence a um campo de estudo relativamente contemporâneo, e uma investigação mais aprofundada é necessária para ampliar a limitada informação disponível neste campo (GUILING et al., 2017). O ângulo de repouso, o ângulo de inclinação e a razão de Hausner são frequentemente usados para estimar a fluidez de materiais particulados.

Existem diferentes afirmações sobre a influência do tamanho da partícula no ângulo de repouso. Os pós finos, geralmente coesivos, possuem ângulos de repouso maiores que 40° , para materiais granulares (maiores que $100 \mu\text{m}$), o ângulo de repouso não parece mudar de forma sistemática com o tamanho da partícula. O ângulo de repouso diminui gradualmente à medida que o tamanho médio aumenta, indicando que os pós mudam de coesos para um fluxo mais livre com o aumento do tamanho médio (BAESSO, KARL, SPITZER, 2021).

O ângulo de repouso diminui com o aumento do tamanho do grão para diâmetros inferiores a $50 \mu\text{m}$ (LUMAY et al., 2012); depois são constantes. Em contraste, no entanto, também há relatos de que há um tamanho de partícula crítico no qual um aumento ou diminuição no tamanho de partícula resulta em um aumento no ângulo de repouso (LUMAY et al., 2012; KALMAN, 2021).

Kalman (2021), dá uma visão geral da literatura sobre a dependência do ângulo de repouso do teor de umidade. Para o carvão pulverizado, o aumento do teor de umidade diminuirá a fluidez. (WANG et al., 2010). Zaalouk e Zabady (2008) completam que pós geralmente coesivos, como aqueles contendo partículas menores que $100\mu\text{m}$ de tamanho, ou aqueles com alto teor de umidade, geralmente possuem altos ângulos de repouso.

Kalman (2021) sugere um método experimental para quantificação dos mecanismos que governam o ângulo de repouso para estimar a fluidez dos materiais particulados. Neste estudo foram investigados 17 materiais diferentes com vários tamanhos de partículas diferentes resultando em 65 amostras. Alguns dos materiais particulados eram esféricos, enquanto outros tinham formas irregulares, conforme a Figura 4.



Figura 4 - Fotografias de partículas de materiais testados mostrando suas diferentes formas.

Fonte: Kalman, 2021.

Vários métodos podem ser utilizados para determinar o ângulo de repouso de materiais particulados, porém o valor obtido dependerá não só das condições do sólido, como carga elétrica e umidade, mas também, do método utilizado e da habilidade e competência do operador. A maioria das investigações relevantes testou o efeito do tamanho da partícula no ângulo de repouso. E um segundo efeito, que tem interessado muitos pesquisadores, é a influência do teor de umidade no ângulo de repouso. Conforme Ileleji e Zhou (2008) que determinou o ângulo de repouso de partículas de palha de milho preparadas em quatro granulometrias e dois teores de umidade, os resultados mostram que o tamanho das partículas e o teor de umidade da matéria-prima forma variáveis importantes que afetaram o ângulo de repouso.

A determinação do ângulo de repouso de um material granular é fundamental para a antecipação de medidas adicionais de segurança durante seu manuseio e para

o adequado projeto de máquinas e equipamentos destinados à sua movimentação e armazenagem (CARDOSO, 2020).

O aumento do teor de umidade aumentará o ângulo de repouso e, assim, diminuirá a fluidez do pó (WANG et al., 2010). Assim, as considerações de ângulo de repouso são um bom indicador da fluidez do sólido particulado e ajuda a compreender o comportamento dos materiais granulares.

A fluidez é a propriedade de materiais a granel caracterizada pela liberdade das partículas constituintes, ou grupos de partículas, de se mover individualmente quando o material a granel é colocado em movimento por alguma força, gravidade ou outra. O fluxo de um pó é um fenômeno complexo que é sensível às propriedades do próprio pó e a fatores externos, como umidade. Dentro do pó, muitos parâmetros afetam as propriedades de fluxo (SCHLICK-HASPER et al., 2022).

Os principais fatores de influência são o tamanho e a forma das partículas e a forma e a largura da distribuição do tamanho das partículas. Outros fatores de influência nomeados são rugosidade da superfície, densidade do material, características eletrostáticas, composição química e teor de umidade. (MARCHETTI, HULME-SMITH, 2021).

A rugosidade da base sobre a qual os materiais granulares são lançados influencia os valores do ângulo de repouso. Quanto mais áspera é a base, maior é o ângulo de repouso. O mecanismo como o ângulo de repouso é obtido nas bases ásperas e lisas é diferente. O ângulo de repouso alcançado na base rugosa se desenvolver quando o material granular se move na face da pilha granular.

Braga et al (2019) analisaram o ângulo de repouso para quatro faixas granulométricas de esferas de vidro e areia normalizada. As esferas utilizadas nos ensaios foram do tipo A170, A120, A090 e A072 de acordo com a classificação da empresa fornecedora (Potters Industrial Ltda) para simular solos granulares e que garante uma esfericidade mínima de 80%. Já a areia foi normalizada segundo a NBR7214 (ABNT/2015), separada em quatro frações granulométricas: grossa (#16 – 1,16mm), média grossa (#30 – 0,60mm), média fina (#50 – 0,36mm) e fina (#100 – 0,15mm). Concluíram que ambos os materiais granulares o ângulo de repouso aumenta com o aumento do diâmetro. Além disso, constatou-se a influência da morfologia do material, observando que os materiais angulares apresentam maiores ângulos de repouso.

Emery et al. (2009) estudaram o efeito do teor de umidade em quatro pós farmacêuticos (um ingrediente farmacêutico ativo (IFA), Aspartame, Hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) e Respitose ML001). Verificou-se que os pós IFA e Respitose não são higroscópicos e foram testados apenas em seus teores de umidade nativa. O Aspartame foi testado em teores de umidade de 0%, 2%, 5% e 8% e o HPMC também foi testado em teores de umidade de 0%, 2%, 5% e 10%. A fluidez do pó foi medida usando o índice de cisalhamento de Jenike, a razão de Hausner, o índice de Carr e os ângulos de repouso estáticos e dinâmicos. Concluíram que o aumento do teor de umidade diminuiu não linearmente a fluidez do HPMC e aumentou não linearmente a fluidez do Aspartame.

Recentemente, Al-Hashemi Al-Amoudi (2018) publicaram uma revisão sobre diferentes métodos para medir o ângulo de repouso. Os métodos mais comuns usados para determinar fisicamente o ângulo de repouso são: método de caixa inclinada, método de funil fixo, método cilindro/tambor giratório, método do cilindro oco e método do cilindro de inclinação. O método de caixa inclinada consiste em colocar o material com grãos de tamanho inferior a 10 mm em uma caixa que é inclinada 18° por minuto até que ele comece a escoar, como demonstrado na Figura 5. Concluíram que o ângulo de repouso tem a tendência em aumentar quando se tem superfícies e partículas mais rugosas e maior umidade, e tendência a diminuir com o aumento do tamanho do sólido e da quantidade empilhada.

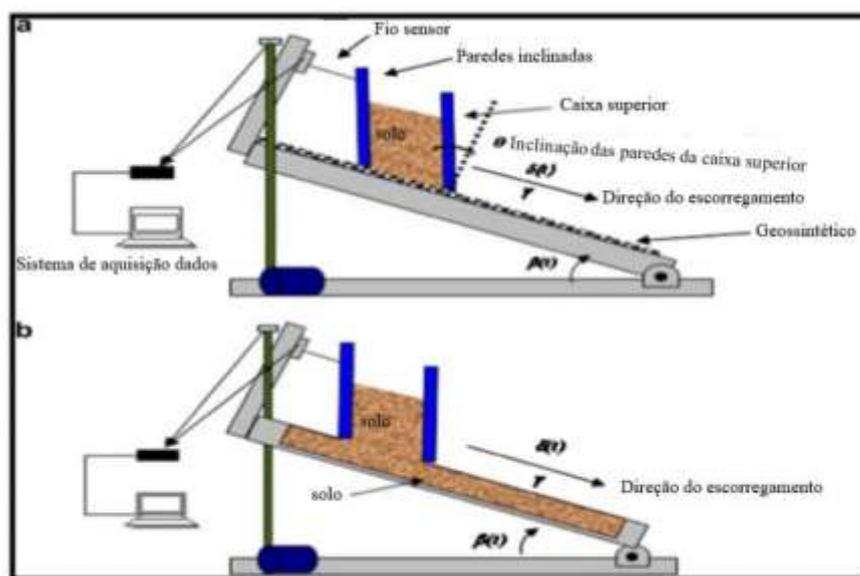


Figura 5 – Método de caixa inclinada para medição do coeficiente de atrito estático.

Fonte: Al-Hashemi Al-Amoudi, 2018.

Constataram que tirar uma conclusão ou realizar uma comparação entre os diferentes métodos de medição podem ser desafiadores porque cada método de medição é direcionado para uma aplicação específica. Também advertiram que durante a medição pequenas alterações nas condições e complicações durante a repetibilidade e reprodutibilidade podem resultar em conclusões equivocadas.

O ângulo de repouso é influenciado pelas condições ambientais (por exemplo, umidade) e pelas propriedades intrínsecas do material. Por exemplo, Zaalouk e Zabadi (2008) e Bhople, Kumar e Haldkar (2017) mostraram o efeito de vários teores de umidade em grãos e cereais, onde a presença de umidade leva a um aumento no ângulo de repouso medido. Resultados semelhantes foram obtidos por Wang et al. (2010), que também estudou o impacto do tamanho da partícula no ângulo de repouso.

LUMAY et al. (2012) analisaram três técnicas que podem ser usadas para caracterizar as propriedades macroscópicas de materiais granulares. O primeiro método (GranuHeap), é baseado na medição clássica do ângulo de repouso, fornece informações sobre as propriedades estáticas da montagem. O segundo (GranuPaq), baseado na conhecida medição de densidade vazada, estima as propriedades quase estáticas de uma pilha granular. Finalmente, o (GranuDrum) quantifica as propriedades de fluxo de um material granular. Para ilustrar como essas medições podem ser usadas em casos práticos, três tipos de materiais granulares foram analisados: abrasivos de carboneto de silício, farinhas e arroz. Mostra-se na Figura 6 os métodos de medições mencionados.



Figura 6 – Métodos de medições para caracterizar as propriedades macroscópicas de materiais granulares.

Fonte: Lumay et al, 2012.

Concluíram que a análise macroscópica dos abrasivos mostrou que a coesão entre os grãos torna-se importante quando o diâmetro do grão é inferior a 50 μ m.

Elekes e Parteli (2021) observaram impactos idênticos no ângulo de repouso considerando diferentes ambientes planetários com a ajuda de simulações dos métodos dos elementos discretos (DEM). Além disso, Zhou et al. (2014) usaram simulações DEM para estudar o efeito da forma dos grânulos na criação do ângulo de repouso, alterando a proporção. Notavelmente, os autores negligenciaram o travamento rotacional de partículas esféricas simuladas, que é uma prática comum em simulações DEM. O ângulo de repouso mais baixo foi simulado para materiais esféricos totais, enquanto uma pequena alteração na forma do grânulo leva a ângulos de repouso maiores.

Lu et al. (2018) analisaram o efeito da umidade na fluidez do carvão pulverizado. Determinaram o ângulo de repouso, razão de Hausner, índice de fluidez de Carr com um Hosokawa Micron Powder Tester (PT-X) que é o único instrumento de caracterização de pó baseado no método do índice de Carr de acordo com o padrão ASTM. Observaram que o ângulo de repouso aumenta à medida que o teor de umidade aumenta. Concluíram que observações experimentais e previsões de modelos mostram que o teor de umidade pode afetar as propriedades de fluxo e as forças interpartículas do carvão pulverizado.

Em geral, aumentar o teor de umidade de um pó diminui sua capacidade de fluir suavemente. Uma das principais causas é o aumento da espessura da camada líquida adsorvida, o que aumenta a resistência das pontes líquidas formadas entre as partículas. Por exemplo, Abou-Chakra e Tüzün (2000) descobriram que apenas a umidade da superfície do carvão, e não sua umidade inerente ou cristalina, afetava sua fluidez. O aumento da umidade superficial causou aumento da tensão superficial, o que causou coesão entre as partículas.

2.3 Coesão e adesão entre partículas

A determinação das propriedades do revestimento da parede e, mais importante, das propriedades de fluxo de um material a granel é crítica para o projeto de qualquer sistema de manuseio de materiais a granel.

A escoabilidade de partículas sólidas sofre influência das forças de atração ou coesão entre as partículas. Segundo Carr, Roberts e Wheeler (2019) a determinação das propriedades do revestimento da parede e, mais importante, das propriedades de fluxo de um material a granel é fundamental para o projeto de qualquer sistema de manuseio de materiais a granel.

Os mecanismos de adesão e coesão de materiais a granel podem ser distinguidos pela ocorrência de pontes materiais entre os parceiros de atração. Esses mecanismos de ligação, no entanto, podem ocorrer com ou sem pontes de material. Os principais tipos de forças de atração ou coesão entre partículas encontram-se descritos a seguir.

2.3.1 Índice de Hausner

Introduzido por Hausner em 1967 enquanto estudava pós de cobre, o índice de Hausner foi descrito como “um indicador da condição de atrito entre partículas de pó” (HAUSNER apud SAKER, 2019).

Para a determinação da razão de Hausner, a densidade aparente compactada ρ_t e densidade aerada ρ_a de uma substância em pó ou granular são medidos. A razão de Hausner é definida da seguinte forma:

$$HR = \frac{\rho_t}{\rho_a}$$

Diferentes termos são usados na literatura para essas duas densidades. Sinônimos para a densidade aparente compactada também são densidade compactada (BAESSO, KARL, PITZER., 2021) ou densidade aparente após compactação (DIN, 1995); expressões para a densidade aparente aerada também são densidade aparente, densidade vazada (MARCHETTI, HULME-SMITH, 2021), densidade aparente livre (KALMAN, 2021) ou densidade aparente solta. (ASTM D7481–18, 2018).

Medir essas duas densidades é uma prática comum para caracterizar o comportamento de materiais em pó e granulados durante o armazenamento, processamento e transporte. A densidade aparente aerada é útil para prever o volume máximo que um material aerado ocupará em um recipiente; a densidade aparente

compactada fornece uma medida do volume ocupado por um material a granel que foi vibrado. (CAIN, QUESNEL, 1996).

A razão de Hausner é uma medida indireta da propriedade de um material a granel para reduzir seu volume sob influência mecânica. (LU et al., 2018). É também uma medida da capacidade de compressão e da interação entre as partículas. Em um pó de fluxo livre, essas interações são menos importantes e os valores de densidade aparente e densidade compactada são mais próximos. Uma razão de Hausner baixa significa que o material flui mais facilmente. No caso de substâncias menos fluidas, há interações significativamente maiores entre as partículas, e a razão de Hausner é maior.

2.4 Propriedades do pó que afetam a fluidez

Segundo Freeman (2000), Cain (2002), Behera et al. (2002) e Juliano et al. (2006), o comportamento coesivo em sólidos a granel é causado por inúmeros mecanismos, como a presença de umidade (efeitos de umidade, líquido livre, entrada de umidade, etc.), forças interpartículas (Van der Waals, forças eletrostáticas, umidade, etc.), consolidação temporal e intertravamento geométrico de materiais granulares.

Yamane et al. (1995) realizaram estudos com método dos elementos discretos (DEM) e imagem de ressonância magnética (IRM) de fluxos de partículas em um tambor rotativo usando sementes de mostarda não esféricas. Eles observaram que a não esfericidade das partículas causa um ângulo dinâmico de repouso mais acentuado para velocidade em taxas de rotação de até 30 rpm. Verificou-se que a estrutura ou rugosidade da superfície tem um grande impacto na fluidez em comparação com a forma de partícula e distribuição de tamanho em estudos feitos por Popov et al. (1996) e Oshima et al. (1995).

Jensen et al. (1999) realizaram simulações DEM para comparar a resistência ao cisalhamento de partículas agrupadas e não agrupadas com rugosidade superficial variável. Este método modela uma partícula de forma geral combinando várias partículas menores de forma mais simples, como um círculo, em grupos que agem como uma única partícula maior. Eles demonstraram que as rotações das partículas foram reduzidas em partículas agrupadas devido ao intertravamento das partículas,

aumentando assim a resistência ao cisalhamento em comparação com partículas não agrupadas.

lida et al. (1997) observaram um aumento na fluidez e uma diminuição na coesão à medida que a forma das partículas dos pós de celulose se aproximava de uma esfera. Dury e Ristow (1998) descobriram que o ângulo de repouso era maior para partículas não esféricas, pois as rotações eram mais suprimidas, resultando em um maior coeficiente de atrito.

Fitzpatrick et al. (2004) fizeram estudos de fluidez em alimentos em pó com diferentes propriedades físicas. Os autores não observaram nenhuma relação forte entre as propriedades físicas do pó medidas e seus índices de fluidez. A teoria da mecânica dos solos em estado crítico de 1968, descrita por Juliano et al. (2006), reconhece que o pico de resistência nos solos se deve ao atrito e às forças de intertravamento entre as partículas. Juliano et al. (2006) realizaram estudos de fluidez em alimentos em pó usando medições de cisalhamento e observaram ângulos de atrito interno mais altos, principalmente devido ao intertravamento entre as partículas durante o teste de cisalhamento.

Embora os estudos citados confirmem uma influência de tamanho, distribuição de tamanho, forma e rugosidade da superfície, contudo são para pós específicos e não foi encontrado nenhum método sistemático para prever a maneira como um determinado pó fluirá com base na medição dessas propriedades.

2.5 escoamento de materiais sólidos

Segundo Janike (1964), “o escoamento de um qualquer material realiza-se quando as pressões presentes são tais que o corte ocorre sem destruir as propriedades do produto armazenado.” As pressões que se desenvolvem num sólido armazenado podem ter um impacto importante sobre o escoamento livre por gravidade a partir de um silo”, Rotter (2008).

A descarga por gravidade de um produto armazenado pode realizar-se mediante dois tipos de escoamento: escoamento de massa e escoamento de funil conforme a Figura 7. A diferença entre o escoamento ocorre devido a diferenças entre as propriedades físicas do produto, a geometria, e as características da superfície da tremonha.

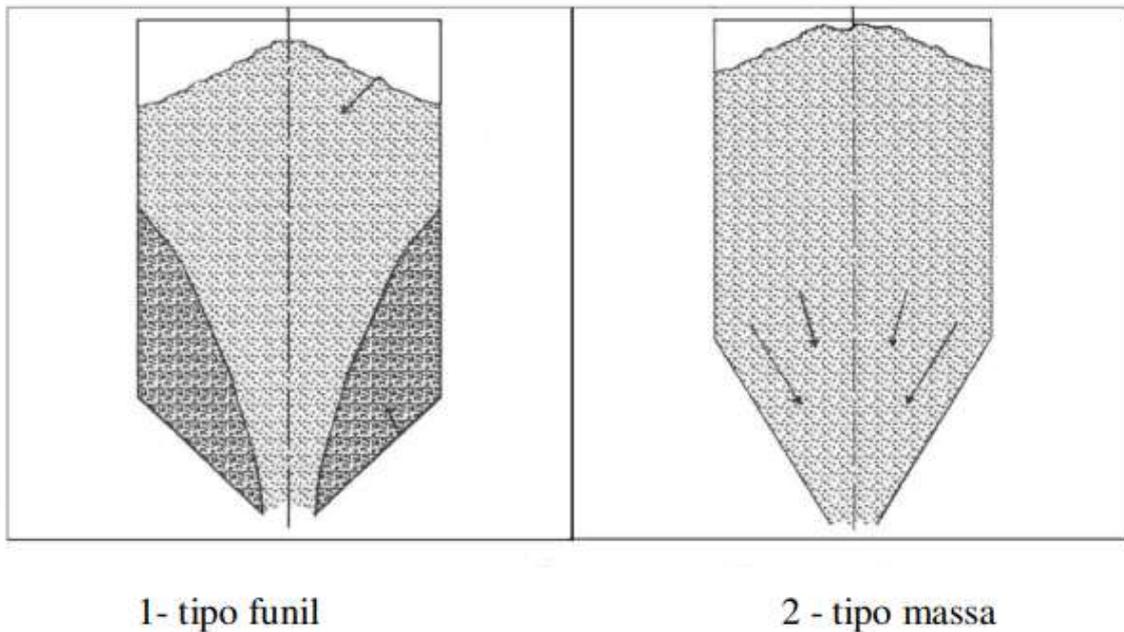


Figura 7 – Tipos de escoamento.

Fonte: Fortes Filho, J., 1985.

As principais diferenças entre os tipos de escoamento estão nas mudanças de movimento entre várias zonas do escoamento. Geralmente no escoamento de massa todo o material sólido dentro do silo está em movimento, apesar disso não à mesma velocidade. Para Chase (2004), no escoamento de funil apenas o material no centro do escoamento, acima da saída da tremonha, está em movimento enquanto o material que está em contato com as paredes se mantém estagnado.

O escoamento de massa, representado na Figura 5 por (2), considera que todo o material está em movimento e não existem regiões estagnadas. Ocorre quando o atrito das paredes é baixo e o declive é suficientemente elevado para as partículas deslizarem sobre ele. Recorre à função *first-in first-out*, dado que o material que entra no silo em primeiro lugar sai em primeiro lugar (MAYNARD, 2004).

O escoamento de funil, (1) caracteriza-se pela constituição de um canal, acima da abertura de descarga e alinhado com a saída da tremonha, ladeado por uma zona

onde o material sólido a granel se mantém imóvel (região estagnada). Este tipo de escoamento conduz a menores capacidades de armazenamento, devido à região estagnada, que só é removida ao evacuar completamente o silo. É importante referir que o tempo de armazenamento tende a deteriorar o material sólido, e que nas regiões estagnadas poder-se-á encontrar material degradado, existindo mesmo a possibilidade de alteração das suas propriedades.

O escoamento ampliado é uma combinação dos dois tipos de escoamento anteriores, e desenvolve-se quando uma tremonha de escoamento de massa é aliada a uma tremonha de escoamento de funil. O escoamento de massa é concebido para ativar o escoamento em funil, o qual é dimensionado para prevenir a formação da obstrução em tubo. Os ângulos da tremonha de escoamento de funil são inferiores aos necessários para um escoamento de massa (MAYNARD, 2004).

Campos (2012) verificou vários parâmetros de escoamento de pós e materiais sólidos com a intenção de estudar quais propriedades físicas e fatores externos afetam o descarregamento dos mesmos. Utilizou como materiais o leite em pó integral e desnatado, alumina e barbotina de alumina. Determinou os seguintes critérios quantitativos de escoabilidade para os materiais escolhidos: a) Índice de Hausner; b) ângulo de repouso; função de fluxo da célula de Jenike; d) ângulos de atrito interno; e) ângulo de atrito com parede. A tabela 1, demonstra os resultados obtidos em relação aos cálculos dos ângulos de repouso de cada material.

Tabela 1 – Ângulo de repouso dos materiais.

Material	Ângulo de repouso (°)
Leite em pó desnatado	36,3 ± 2,2
Leite em pó integral	46,4 ± 2,0
Alumina	50,2 ± 2,8
Pó cerâmico	44,3 ± 2,2

Fonte: CAMPOS (2012).

Foi identificado também outros fatores que modificam a escoabilidade dos pós como o tamanho da partícula e a umidade. Lista-se na tabela 2 os principais fatores que interferem no escoamento dos sólidos.

Tabela 2 – Características das partículas e fatores que afetam a escoabilidade de pós

Propriedades da partícula	Fatores externos
Composição (tipo do material)	
Massa específica	
Tamanho	Temperatura
Forma	Umidade relativa do ar
Rugosidade	Nível de compactação
Superfície de atrito (revestimento)	Revestimento, aglomeração
Compressibilidade (dureza, elasticidade e ductilidade)	Segregação
Umidade	Antiaglomerantes
Propriedades elétricas (condutividade, capacitância, propensão à carga eletrostática)	

Fonte: JULIANO; BARBOSA-CÁNOVAS (2010).

Concluiu que o leite em pó desnatado fluiu com mais facilidade que pó cerâmico, que o leite integral e que a alumina, nesta ordem. O autor sugeriu determinar a vazão dos materiais em reservatórios com diferentes ângulos de tremonha e com diferentes diâmetros de orifícios de saída, para comparar como os pós se comportarão em uma situação envolvendo descarga de materiais.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Com intenção de caracterizar experimentalmente o descarregamento de um caminhão basculante foi projetado e construído uma unidade piloto do sistema, apresentada na Figura 8, instalada no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília.

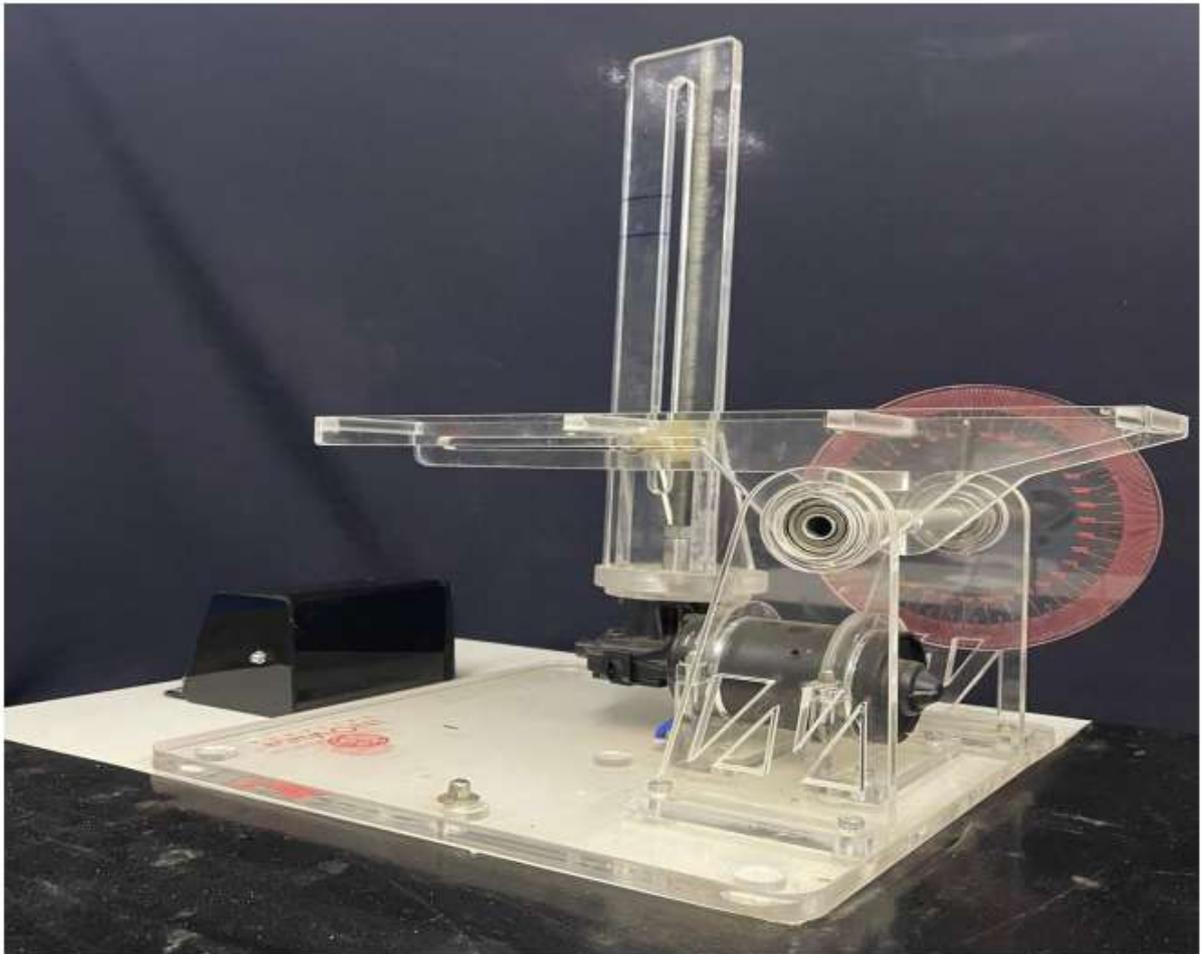


Figura 8 – Unidade experimental piloto do sistema de descarregamento de um aparato para inclinação de superfície projetado no laboratório de Operações Unitárias da Unisanta (Base do sistema de 500 mm X 600 mm).

Foram utilizados três sólidos granulares distintos na realização dos ensaios: a) areia grossa seca, com faixa de mesh de 32-42 (A peneira de 32 mesh tem uma abertura de 0,500mm e a peneira de 42 mesh uma abertura de 0,354mm) e b) areia fina seca, com faixa de mesh de 70-100 (A peneira de 70 mesh tem uma abertura de 0,212mm e a peneira de 100 mesh uma abertura de 0,149mm) e c) minério de ferro, com faixa de mesh de 100-140 (A peneira de 100 mesh tem uma abertura de 0,149mm e a peneira de 140 mesh uma abertura de 0,106mm). Foi realizada a análise granulométrica de ambos os materiais, os quais podem ser observados na Figura 9 em béqueres de 1000 ml.

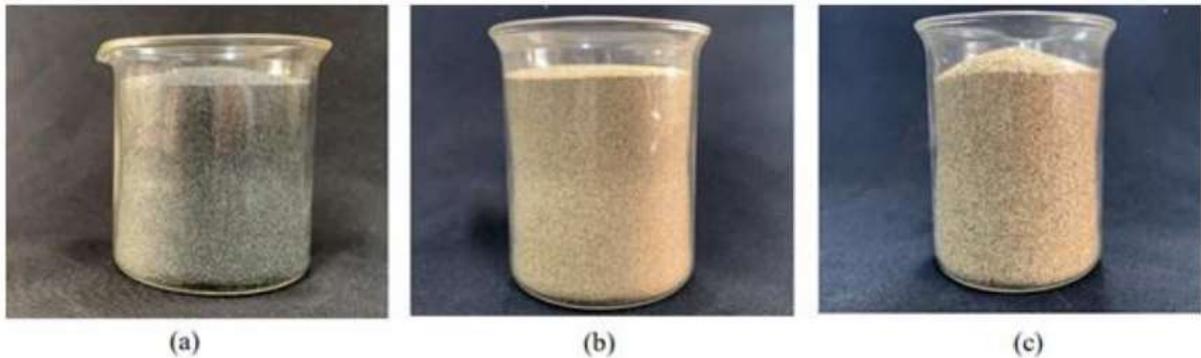


Figura 9 – Materiais estudados: a) Minério de ferro; b) Areia fina; c) Areia grossa.

A fim de se analisar a influência e a eficiência do material das caçambas no ângulo de escorregamento utilizou-se 3 caçambas de materiais diferentes. As três caçambas utilizadas na unidade experimental apresentam dimensões internas de 250 mm de comprimento, 100 mm de altura e 88 mm de largura. A primeira representada na Figura 10.a era uma caçamba de madeira MDF (Medium Density Fiberboard). A segunda caçamba analisada na Figura 10.b era de aço carbono lixado. Por fim, a terceira caçamba utilizada era de aço carbono revestido com tinta automotiva (marca Wandabase HS), representado na Figura 10.c.

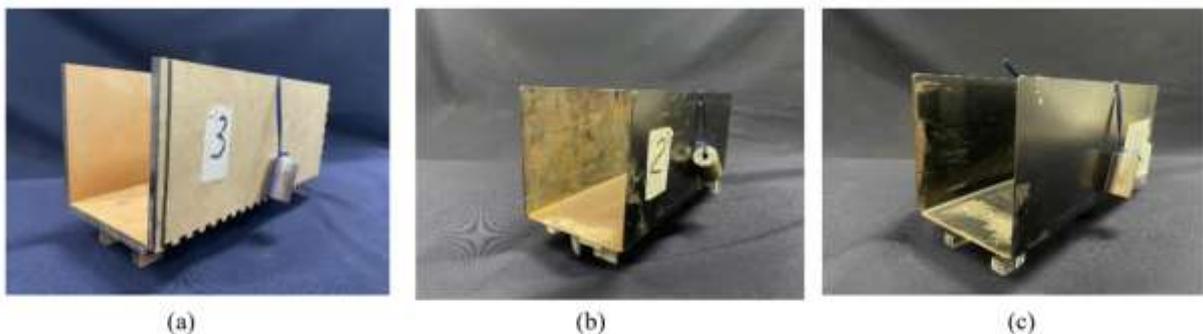


Figura 10 – Caçambas. 10.a) Caçamba de madeira MDF; b) Caçamba de aço carbono lixado; c) Caçamba de aço carbono revestido com tinta automotiva.

Os principais componentes da unidade experimental serão apresentados:

3.1 Suporte da caçamba

As caçambas foram fixadas a um suporte de acrílico retangular com duas travessas no meio também de acrílico onde são encaixados os pés das caçambas (Figura 11). Esse suporte é conectado diretamente ao eixo de inclinação e indiretamente ao fuso roscado através de um oblongo na lateral.

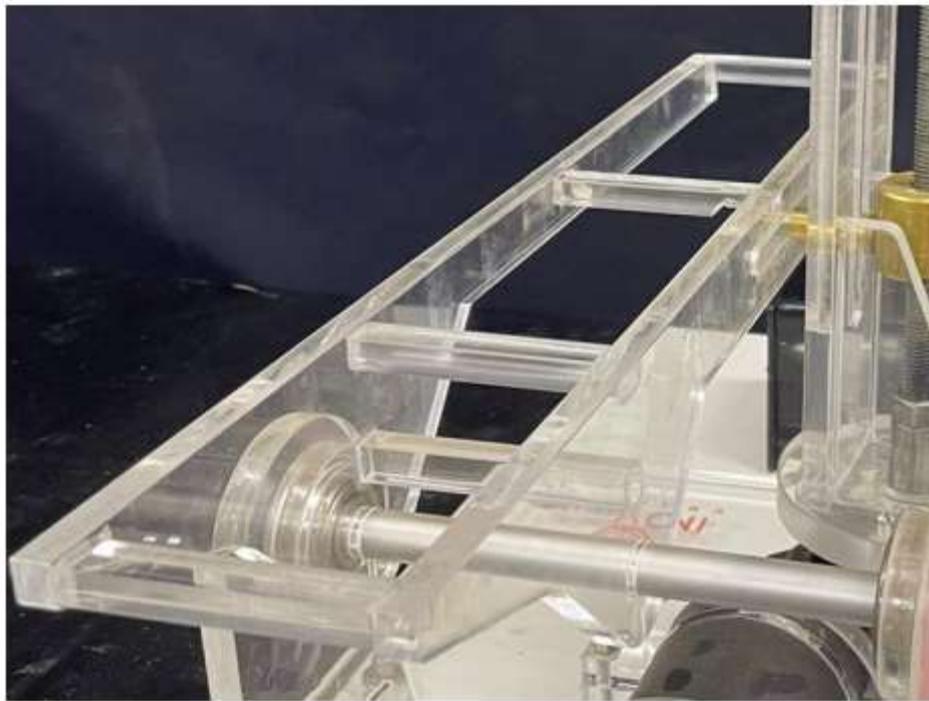


Figura 11 – Suporte das caçambas.

3.2 Motor elétrico

Apresenta-se na Figura 12, o motor elétrico que foi utilizado para o acionamento do fuso roscado do sistema, que era o responsável em gerar a inclinação da caçamba simulando o processo de basculamento da mesma.

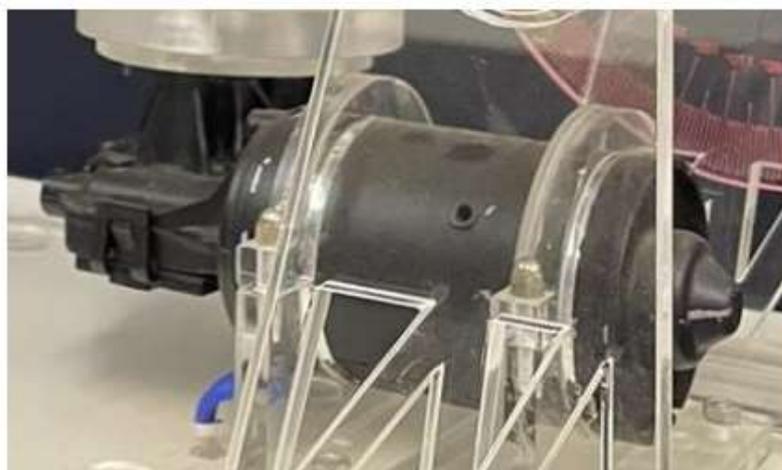


Figura 12 – Motor elétrico.

3.3 Fuso roscado

Ilustra-se na Figura 13, o fuso roscado que é acoplado ao eixo do motor elétrico que ao girar fazia a porca ter um movimento vertical de subida ou descida ocasionando a inclinação da caçamba basculante.



Figura 13 – Fuso roscado com 400mm de comprimento.

3.4 Painel de controle

A unidade experimental é acionada através do painel de controle (Figura 14), composto por um botão para ligar e desligar o motor que aciona o fuso para inclinação ou nivelamento da caçamba, uma chave seletora de movimento (subida e descida) e um potenciômetro que determinava a velocidade angular do sistema.



Figura 14 – Painel de controle.

3.5 Planejamento Experimental

Apresenta-se na Figura 15 o planejamento experimental para leitura do ângulo de descarregamento completo utilizando caçambas com os revestimentos de madeira MDF, aço lixado e aço pintado com tinta automotiva. Os materiais descarregados da caçamba foram minério de ferro, areia fina e areia grossa. Os ensaios foram realizados em triplicata.

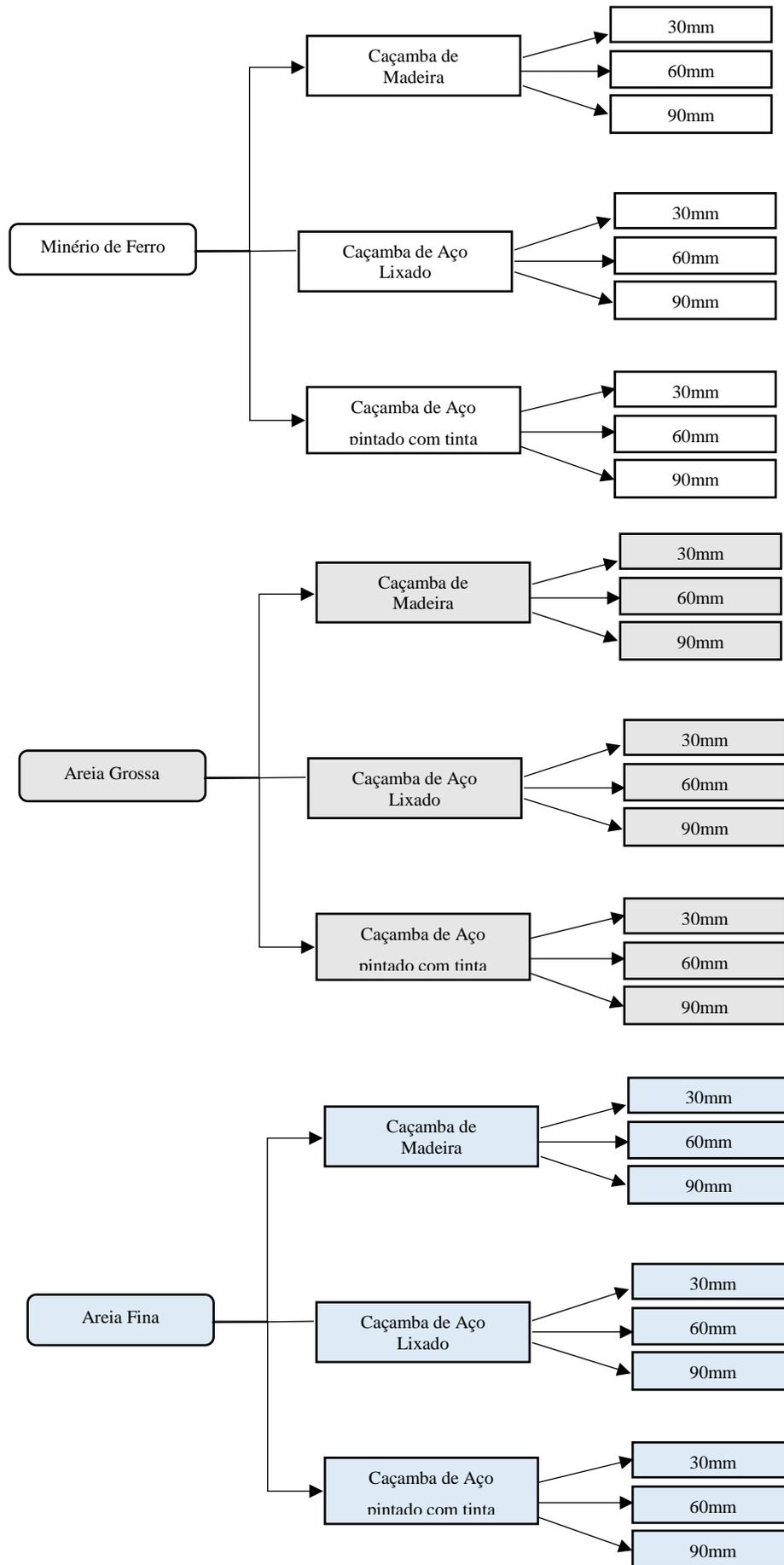


Figura 15 – Planejamento Experimental.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Rugosidade da superfície dos revestimentos das caçambas

Foi utilizado um Rugosímetro Portátil Digital Mitutoyo Modelo SJ-201 para medição da rugosidade da superfície dos revestimentos utilizados nas caçambas conforme Figura 16.



Figura 16 – Equipamento de medição da rugosidade.

No experimento da medição das rugosidades das caçambas os resultados encontrados são mostrados na tabela 3:

Tabela 3 – Resultados da medição de rugosidade

Revestimento da Caçamba	Rugosidade (μm)	Classe de Rugosidade
Madeira MDF	3,787	N9
Aço carbono lixado	1,682	N8
Aço carbono pintado com tinta automotiva	0,497	N6

Com os valores obtidos pelo rugosímetro foi possível determinar que a caçamba de madeira é a que tinha maior rugosidade e a caçamba de aço revestido com tinta a menos rugosa.

4.2 Ângulo de repouso

Com testes em bancada foi obtido os seguintes ângulos de repouso estáticos, demonstrados na tabela 4:

Tabela 4 – Dados dos experimentos do ângulo de repouso estático

Material	Ângulo de Repouso (°)
Areia Fina	30
Areia Grossa	37
Minério de Ferro	29

4.3 Graus de Inclinação

A Tabela 5, refere-se aos resultados médios das triplicatas, do comportamento do minério de ferro, areia fina e areia grossa de acordo com cada revestimento e cada altura estudada.

Tabela 5 – Resultado médio das triplicatas

Caçamba	Matéria-Prima	Altura (mm)	Ângulo (°)
Madeira MDF	Minério de Ferro	30	34,0
Madeira MDF	Minério de Ferro	60	33,7
Madeira MDF	Minério de Ferro	90	32,8
Aço sem revestimento	Minério de Ferro	30	32,3

Aço sem revestimento	Minério de Ferro	60	32,7
Aço sem revestimento	Minério de Ferro	90	33,2
Aço revestido com tinta	Minério de Ferro	30	31,7
Aço revestido com tinta	Minério de Ferro	60	32,2
Aço revestido com tinta	Minério de Ferro	90	31,0
Madeira MDF	Areia Grossa	30	31,5
Madeira MDF	Areia Grossa	60	31,5
Madeira MDF	Areia Grossa	90	32,0
Aço sem revestimento	Areia Grossa	30	31,0
Aço sem revestimento	Areia Grossa	60	30,5
Aço sem revestimento	Areia Grossa	90	31,0
Aço revestido com tinta	Areia Grossa	30	28,5
Aço revestido com tinta	Areia Grossa	60	27,5
Aço revestido com tinta	Areia Grossa	90	29,0
Madeira MDF	Areia Fina	30	34,5
Madeira MDF	Areia Fina	60	34,5
Madeira MDF	Areia Fina	90	34,0
Aço sem revestimento	Areia Fina	30	33,5
Aço sem revestimento	Areia Fina	60	32,5
Aço sem revestimento	Areia Fina	90	32,5
Aço revestido com tinta	Areia Fina	30	31,0
Aço revestido com tinta	Areia Fina	60	32,5
Aço revestido com tinta	Areia Fina	90	29,0

A correlação entre o ângulo de inclinação em função dos revestimentos das caçambas estudadas e matérias-primas podem ser visualizados nas figuras, Figura 17 (altura 30mm), Figura 18 (altura de 60mm) e Figura 19 (altura de 90mm).

Classificou-se a caçamba de madeira MDF como 1, a caçamba de aço sem revestimento como 2 e a caçamba de aço revestido com tinta como 3.

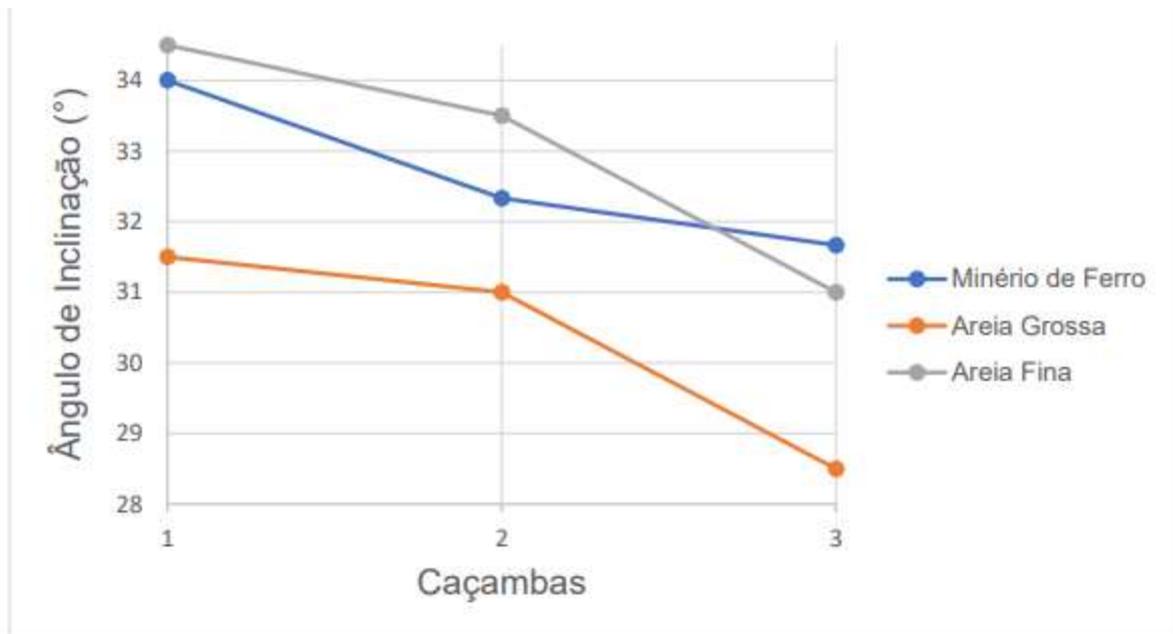


Figura 17 - Média das triplicatas dos ângulos de inclinação em função das caçambas para altura de 30mm. Sendo, 1 a caçamba de madeira, 2 a caçamba de aço sem revestimento e 3 a caçamba de aço revestido com tinta.

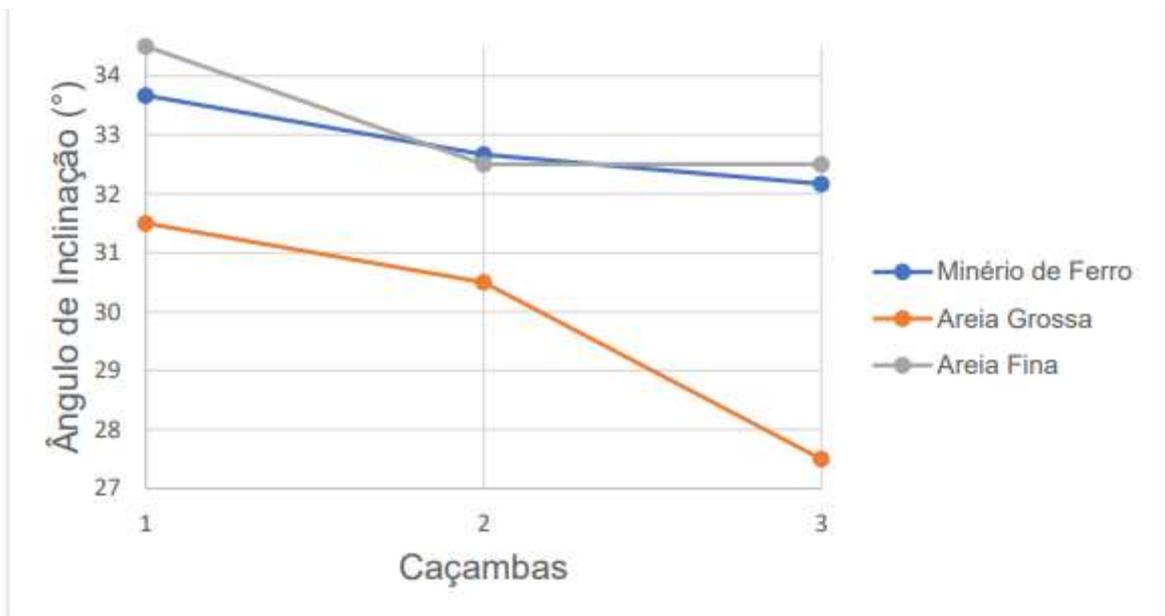


Figura 18 - Média das triplicatas dos ângulos de inclinação em função das caçambas para altura de 60mm. Sendo, 1 a caçamba de madeira, 2 a caçamba de aço sem revestimento e 3 a caçamba de

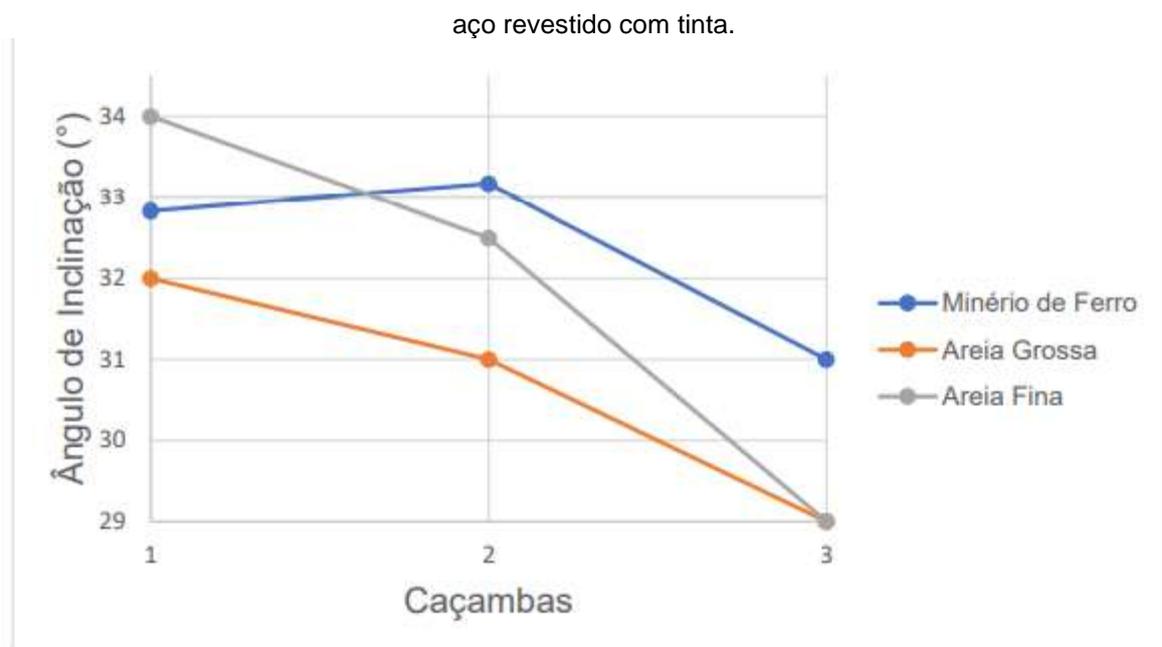


Figura 19: Média das triplicatas dos ângulos de inclinação em função das caçambas para altura de 90mm. Sendo, 1 a caçamba de madeira, 2 a caçamba de aço sem revestimento e 3 a caçamba de aço revestido com tinta.

Pode-se observar que os experimentos são analisados separadamente de acordo com o material transportado que foram areia fina, areia grossa e minério de ferro e suas respostas em relação ao tipo de revestimento da caçamba. O experimento realizado neste trabalho permite a análise das respostas da areia fina, areia grossa e minério de ferro ao ângulo de inclinação para descarregamento da carga.

A partir dos gráficos apresentados observa-se que os ângulos de inclinação para o basculamento de areia grossa, nas três alturas e caçambas, são os menores, ou seja, apresentam um melhor desempenho para escoar o material da caçamba do caminhão isso diminui o risco de tombamento do caminhão. O minério de ferro e a areia fina, não apresentam uma diferença expressiva nas alturas de 30 e 60mm para as três caçambas. Portanto na altura de 90mm, o minério de ferro demonstrou-se no geral um pior desempenho em relação a areia fina.

Nota-se que, para a areia fina, a média do ângulo de inclinação para descarregamento do material, na altura de 30mm foi de 34,5° na caçamba de madeira enquanto na caçamba de aço revestida com tinta a média foi de 31° para a mesma altura de 30mm o que representa uma redução de 8,7%. Já para o minério de ferro, utilizando também a caçamba basculante com revestimento de tinta o ângulo de inclinação reduziu 6,85% na altura de 30mm comparado com a caçamba de madeira.

Na literatura, um experimento físico, a quantidade de material granular ou o número de partículas pode afetar o ângulo de repouso (AL-HASHEMI, 2018).

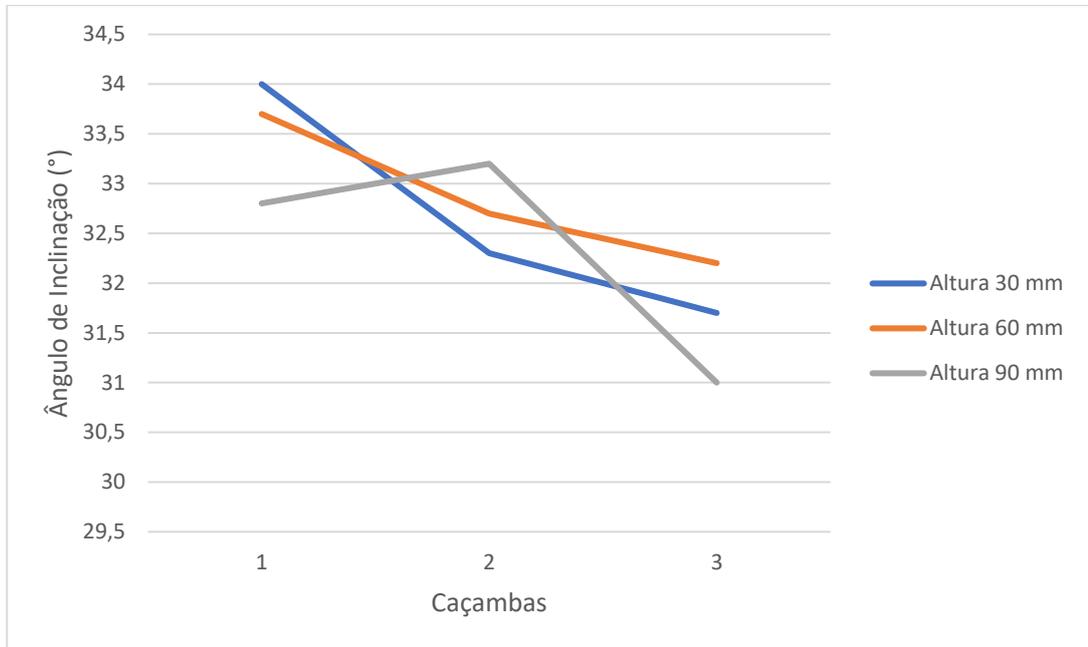


Figura 20: Média das triplicatas dos ângulos de inclinação em função das caçambas para o minério de ferro. Sendo, 1 a caçamba de madeira, 2 a caçamba de aço sem revestimento e 3 a caçamba de aço revestido com tinta.

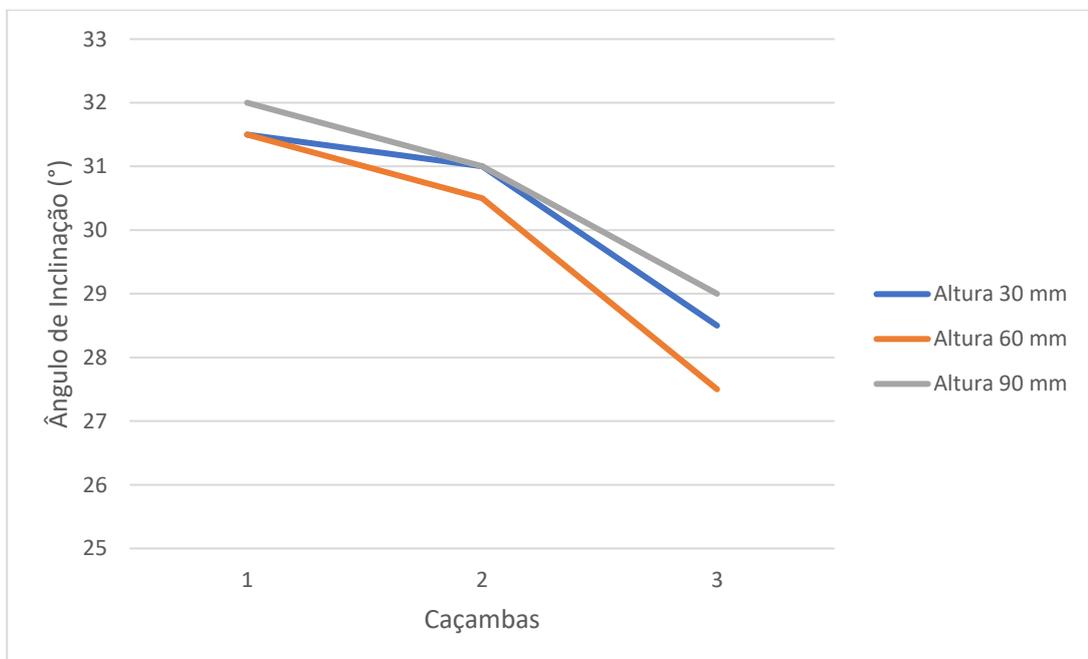


Figura 21: Média das triplicatas dos ângulos de inclinação em função das caçambas para areia grossa. Sendo, 1 a caçamba de madeira, 2 a caçamba de aço sem revestimento e 3 a caçamba de aço revestido com tinta.

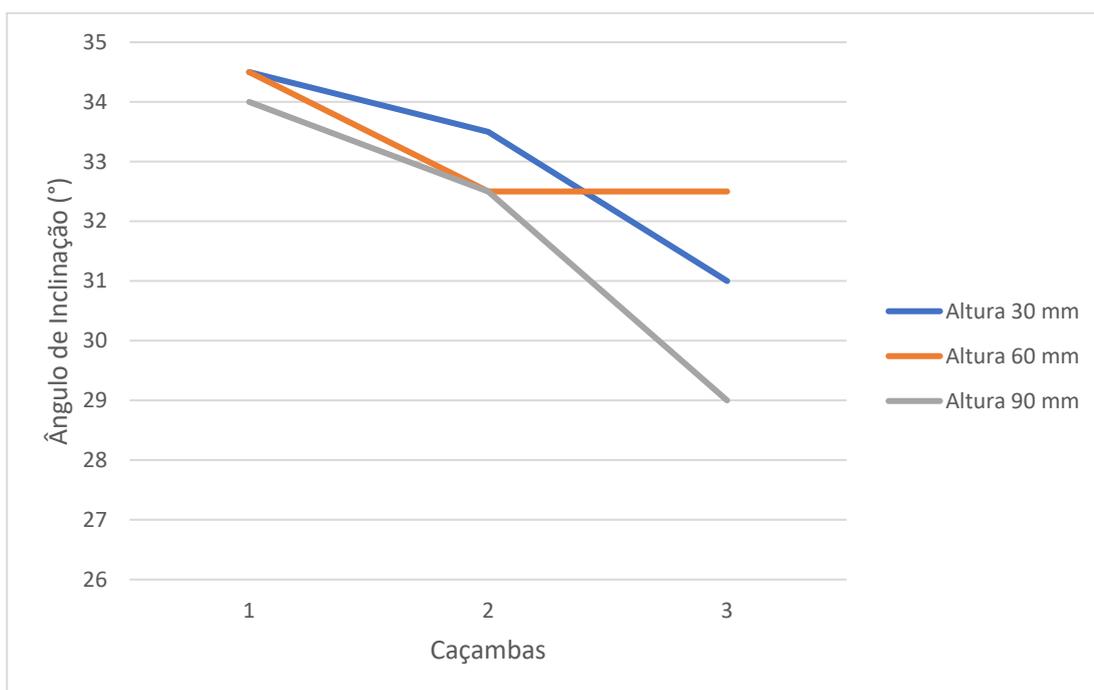


Figura 22: Média das triplicatas dos ângulos de inclinação em função das caçambas para areia fina. Sendo, 1 a caçamba de madeira, 2 a caçamba de aço sem revestimento e 3 a caçamba de aço revestido com tinta.

Nas figuras 20, 21 e 22 apresentadas são comparadas cada material de maneira individualizada sendo minério de ferro, areia grossa e areia fina respectivamente.

Os resultados experimentais obtidos permitem afirmar que o revestimento interno da caçamba exerce relevante influência no ângulo de inclinação necessário para que toda a carga seja efetivamente descarregada. Um revestimento com uma rugosidade maior diminui a capacidade da carga transportada fluir durante o basculamento. Vários parâmetros de rugosidade da superfície foram usados em trabalhos científicos para determinar a relação entre a rugosidade da superfície e a resistência ao deslizamento. (MIKLECIC, 2021).

Pode-se observar que a caçamba de madeira foi a que apresentou pior desempenho em relação ao aumento do ângulo de descarregamento total tanto na areia fina, areia grossa e no minério de ferro em todas as alturas analisadas. Nota-se nos gráficos acima que as caçambas de aço sem revestimento e com revestimento são as que demonstraram melhor desempenho em relação ao menor ângulo de descarregamento total na areia fina, areia grossa e no minério de ferro em todas as alturas analisadas.

4.4 Material retido na caçamba

Apresenta-se na tabela 6 a média aritmética das triplicatas das massas de escorregamento e as massas retidas nas caçambas (Apêndice A2), assim como a % de material que é perdido durante o basculamento. A massa retida nas caçambas durante os ensaios representa a quantidade de material que se perde para que não se force o aumento do ângulo de inclinação a fim de se retirar toda a carga da caçamba, aumentando os riscos de solavancos do caminhão e possível tombamento.

Com os dados coletados calculou-se a porcentagem de resíduo retido nas caçambas a partir da equação abaixo.

$$\% \text{ Material Retido} = \frac{m_R}{m_T} \cdot 100$$

Sendo,

% Material Retido	a porcentagem de massa retida na caçamba (%);
m_R	a massa retida na caçamba (g) e
m_T	a massa total (g).

A massa total foi obtida pela soma da massa retida com a massa escorregada das caçambas.

$$m_T = m_R + m_E$$

Sendo,

m_T	a massa total (g)
m_R	a massa retida na caçamba (g) e
m_E	a massa escorregada (g).

Tabela 6 – Material Retido

Revestimento da caçamba	Matéria-Prima	Massa Escorregada (g)	Massa Retida (g)	% Resíduo
Madeira MDF	Minério de Ferro	2761,13	18,0	0,65
Madeira MDF	Areia Grossa	1622,17	2,4	0,17
Madeira MDF	Areia Fina	1620,5	3,5	0,22
Aço carbono sem revestimento	Minério de Ferro	2782,24	18,5	0,66
Aço carbono sem revestimento	Areia Grossa	1584,33	3,2	0,20
Aço carbono sem revestimento	Areia Fina	1567,17	5,3	0,34
Aço carbono revestida com tinta	Minério de Ferro	2858,8	10,8	0,38
Aço carbono revestida com tinta	Areia Grossa	1622,67	5,7	0,35
Aço carbono revestida com tinta	Areia Fina	1651,50	5,8	0,35

A partir da tabela apresentada é possível constatar que o minério de ferro foi a matéria-prima que apresentou mais dificuldade de escorregamento, tendo uma maior retenção de massa nos processos de basculamento. A areia grossa apresentou um melhor resultado nas caçambas de aço carbono sem revestimento e madeira MDF, sendo sua massa retida quase 0g e na caçamba de aço carbono revestida com tinta a areia grossa obteve valores similares a areia fina.

5 CONCLUSÃO

Os ângulos de descarregamento total da carga das caçambas basculantes foram determinados e utilizados para caracterizar o escorregamento da areia e do minério de ferro e avaliar o efeito da quantidade de material como carga da caçamba e a rugosidade com diferentes revestimentos de caçambas. As observações experimentais mostram que a quantidade material na caçamba pode afetar no ângulo de inclinação necessário para o descarregamento total da carga e no escoamento do material para exemplificar o minério de ferro na caçamba de madeira MDF na altura de 30mm obteve uma média de inclinação de 34° enquanto na altura de 90mm obteve uma média de inclinação de 32,8°. A superfície interna da caçamba, a qual está em contato direto com a carga, é um fator de relevante importância, mais especificamente a rugosidade da superfície do revestimento visto que influencia especificamente no ângulo de inclinação para o descarregamento total da carga. Caçambas com revestimentos que tenham rugosidade menores requerem um menor ângulo de inclinação na realização do basculamento. Dentre os revestimentos empregados neste estudo, a caçamba com revestimento de tinta obteve o melhor desempenho para areia fina, areia grossa e minério de ferro onde o ângulo necessário foi de 29° para areia fina, 29° para areia grossa e para minério de ferro um ângulo de 31° atingiu o descarregamento total. Com base nas conclusões acima para o transporte de areia fina, areia grossa e minério de ferro a caçamba mais indicada e eficiente é com revestimento de tinta, independente da quantidade de material transportada. Trabalhos futuros a serem realizados podem acrescentar outras cargas a serem descarregadas da caçamba de caminhão e variados revestimentos internos na caçamba onde o material a granel é escorregado.

5.1 Sugestões

Para trabalhos futuros a serem realizados, sugerem-se:

- a) Comparações com outros materiais como, por exemplo, diversos tipos de areias ou granulometria de britas.
- b) Outros revestimentos/rugosidade das caçambas, por exemplo, borracha e outros tipos de madeiras.

6 REFERÊNCIAS

ABOU-CHAKRA, H.; TUZUN, U. Microstructural blending of coal to enhance flowability. *Powder Technology*, v. 111, n. 3, p. 200-209, 2000.

AL-HASHEMI, H. M. B. A.; AL-AMOUDI, O.S.B. A review on the angle of repose of granular materials. *Powder Technology*, n. 330, p. 397–417, 2018.

ASTM D7481–18 *Standard test methods für determining loose and tapped bulk densities of powders using a graduated cylinder*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 2018.

BAESSO, I.; KARL, D.; SPITZER, A. Characterization of powder flow behavior for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*., n. 47, p. 1-14, 2021.

BATISTA, E. B.; FIGUEIREDO, A. E. P.; ROSA, V. S.; MORAES JÚNIOR, D. Ângulo de escorregamento de material sólido particulado em caçamba de caminhão. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.9, n.1, p. 2528-2541, jan., 2023.

BEHERA, S.; DAS, S.; HATVANI, Z.; PAHL, M. H. Flowability studies of bulk materials for design of hopper using a Jenike shear cell. *Powder Handling Processing*, v. 14, n. 2, p. 96- 101, 2002.

BELL, T. A. Industrial needs in solids flow for the 21st century'. *Powder Handling Processing*, v. 11, n. 1, p. 9-12, 1999.

BELL, T. A. Solids flowability measurement and interpretation in industry. *Handbook Conv. And Handl.* Part. Sol., n. 10, p. 3-13, 2001.

BHOPLE, S.; KUMAR, A.; HALDKAR, P. Effect of moisture content on angle of repose for different cereals and pulses. *International Journal of Chemical Study*, v. 5, p. 2283–2286, 2017.

BRAGA, A. L. M.; ZULUAGA, R. A. G.; GIRARDI JÚNIOR, J. R.; GARCIA, L. M.; FARIAS, M. M. Avaliação do ângulo de repouso de materiais granulares. Geocentro, 2019. Disponível em: <<https://qe.iweventos.com.br/upload/trabalhos/t1arquivo/mdCLxBHw5FxlInBBbfdC1S kjDfAF3.pdf>> Acesso em: 20 dez. 2022.

BRUSQUE, R. Tombamentos de basculantes são comuns e perigosos – Saiba como evitar. *Blog do Caminhoneiro*. Out. 2021. Disponível em: <<https://blogdocaminhoneiro.com/2021/10/tombamentos-de-basculantes-sao-comuns-e-perigosos-saiba-como-evitar/>> Acesso em: 6 fev. 2022.

CAIN, J. An alternative technique for determining ANSI/CEMA standard 550 flowability ratings for granular materials. *Powder Handling & Processing*, v. 14, n. 3, p. 218-220, 2002.

CAIN, J. H.; QUESNEL, D. J. *A comparison of density measurements for a cohesive powder*. Powder & Bulk Solids. Rosemont (Chigago), IL, 1996.

CAMPOS, M. M. *Análise da escoabilidade de pós*. 2012. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra)- Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

CARR, M. J.; ROBERTS, A. W.; WHEELER, C. A. A revised methodology for the determination of bulk material cohesion and adhesion. *Advanced Powder Technology*, v. 30, n. 10, p. 2110-2116, 2019.

CARDOSO, A. L.; SOUSA FILHO, J. J.; MORAES JÚNIOR, D.; MORAES, M. S.; ROSA, V. S.; FRIAS, R. C. A. A. Experimental determination of the soybean meal NGMO angle of repose (non-transgenic) and GMO (genetically modified) bench unit and port terminal batteries. *Brazilian Applied Science Review*, Curitiba, v. 4, n. 4, p. 2546-2557, jul./ago. 2020.

CHASE, G. *Solid notes on hopper design*: solids processing course, University of Akron, 2004.

CHENG, N.; ZHAO, K. Difference between static and dynamic angle of repose of uniform sediment grains, *Int. J. Sediment Res.*, n. 32, p. 149-154, 2017.

CHUKWU, O.; AKANDE, F. B Development of na apparatus for measuring angle of repose of granular materials, *Conference Proceedings*, 2007.

DUTTA, A.; DULLEA, L. V. Comparative evaluation of negatively and positively charged submicron particles as flow conditioners for a cohesive powder (Conference Paper). *AIChE Symposium Series*, v. 86, n. 276, p. 26-40, 1990.

DURY, C. M.; RISTOW, G. H.; MOSS, J. L.; NAKAGAWA, M. Boundary effects on the angle of repose in rotating cylinders. *Physical Review E*, n. 57, p. 4491-4497, 1998.

ELEKES, F.; PARTELI, E. J. R. An expression for the angle of repose of dry cohesive granular materials on Earth and in planetary environments. *PNAS*, n. 118, p. 1-8, 2021.

EMERY, E.; OLIVER, J.; PUGSLEY, T.; SHARMA, J.; ZHOU, J. Flowability of moist pharmaceutical powders. *Powder Technology*, n. 189, p. 409–415, 2009.

FITZPATRICK, J. J.; BARRINGER, S. A.; IQBAL, T. Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values. *Journal of Food Engineering*, v. 61, p. 399-405, 2004.

FITZPARTICK, J. J.; AHRNE, L. Food powder handling and processing: Industry problems, knowledge barriers and research opportunities. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 44, n. 2, p. 209-214, 2005.

FREEMAN, R. The flowability of powders-an empirical approach. *International Conference Powder & Bulk Solids Handl.*, June 2000, IMechE HQ, London.

GRAY, R. O.; BEDDOW, J. K. Powder Technology, n. 2, p. 323-326, 1968.

GUILING, X.; XIAOPING, C.; CAI, L.; PAN, X.; CHANGSUI, Z. Experimental investigation on the flowability properties of cohesive carbonaceous powders. *Particulate Science and Technology*, n. 35, p. 322–329, 2017.

HENRIQUE, E. C. S.; CORDEIRO, L. A.; RIBEIRO, R. B. Análise da logística terceirizada do transporte rodoviário de cargas: um estudo teórico. *Janus*, Lorena, n. 14, p. 33-48, jun./dez. 2011.

ILELEJI, K. E.; ZHOU, B. The angle of repose of bulk corn stover particles, *Powder Tehnology*, v. 187, n. 2, p. 110-118, 2008.

JANIKE, A. W. Storage and flow of solids. *Bulletin n. 123*. University of Utah, Salt Lake City, 1964.

JAWORSKI, T. *Equipamentos para escavação: compactação e transporte*. Curitiba, 2015.

JENSEN, R. P., BOSSCHER, P. J., PLESHA, M. E.; EDIL, T. B. DEM simulation of granular media structure interface: Effects of surface roughness and particle shape. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, n. 23, p. 531-547, 1999.

JUAREZ-ENRIQUEZ, E.; OLIVAS G.I.; ZAMUDIO-FLORES, P.B.; PEREZ-VEGA, S.; SALMERON, I.; ORTEGA-RIVAS, E.; SEPULVEDA, D.R. A review on the influence of water on food powder flowability. *J. Food Process Eng.*, 45, 2022.

JULIANO, P., MUHUNTHAN, B.; GUSTAVO, V. B. Flow and shear descriptors of preconsolidated food powders. *Journal of Food Engineering.*, n. 72, p. 157-166, 2006.

JULIANO, P.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Food Powders Flowability Characterization: Theory, Methods, and Applications. *Annual Review of Food Science and Technology*, v. 1, n. 1, p. 211–239, 2010.

KALMAN, H. Quantification of mechanisms governing the angle of repose, angle of tilting, and Hausner ratio to estimate the flowability of particulate materials. *Powder Technology*, n. 382, p. 573-593, 2021.

IIDA, K.; AOKI, K.; DANJO, K.; OTSUKA, A.; CHEN, C. Y.; HORISAWA, E. A comparative evaluation of the mechanical properties of various celluloses. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, v. 45, n. 1, p. 217-220, 1997.

LU, H.; GUO, X.; JIN, Y.; GONG, X. Effect of moisture on flowability of pulverized coal. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 133, p. 326-34, 2018.

LU, H.; RUAN H.; POLETTO M.; GUO X.; LIU H.; Study on fine powder discharged from hoppers modified with insert, *Powder Technology*, Volume 423, 2023.

LUMAY, G.; BOSCHINI, F.; TRAINA, K.; BONTEMPI, S.; REMY, J.; CLOOTS, R.; VANDEWALLE, N. Measuring the flowing properties of powders and grains. *Powder Technology*, n. 224, p. 19–27, 2012.

MAYNARD, E. *Practical solutions for solving bulk solids flow problems*. Janike & Johanson Inc., 2004.

MARCHETTI, L.; HULME-SMITH, C. Flowability of steel and tool steel powders: a comparison between testing methods. *Powder Technology*, n. 384, p. 402-413, 2021.

MITRA, H.; PUSHPADASS, H. A.; FRANKLIN, M. E. E.; AMBROSE, R. P. K.; GHOROI, C.; BATTULA, S. N. Influence of moisture content on the flow properties of basundi mix. *Powder Technology*, v. 312, p. 133–143, 2017.

OSHIMA, T.; ZANG, Y. L.; HIROTA, M.; SUZUKI, M.; NAKAGAWA, T. The effect of the types of mills on the flowability of ground powders. *Advance Powder Technology*, v. 6, n. 1, p. 35-45, 1995.

PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA. *PNL-2035*. Empresa de Planejamento e Logística. Brasília, 2021.

POPOV, K. I.; PAVLOVIC, M. G.; PAVLOVIC, L. J.; IVANOVIC, E. R.; KRSTIC, S. B.; ZOU, R. P.; YU, A. B. Evaluation of the packing characteristics of mono-sized non-spherical particles. *Powder Technology*, n. 88, p. 71-79, 1996.

PORTAL GOVERNO. *Caminhão – Basculante – Iveco – Tector 24-280*. 2023. Disponível em: <<https://portalgoverno.com.br/product/caminhao-basculante-iveco-tector-24-280-2/>> Acesso em: 10 nov. 2022.

PRESCOTT, J. K.; BARNUM, R. A. On Powder Flowability. *Pharmaceutical Technology*, Oct, p. 60-84, 2000.

ROTTER, J. *Bulk solids handling*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, 2008.

SAKER, A.; CARES-PACHECO, M. G.; MARCHAL, P.; FALK, V. Powders flowability assessment in granular compaction: What about the consistency of Hausner ratio?. *Powder Technology*, n. 354, p.52-63, 2019.

SCHLICK-HASPER, E, BETHKE, J, VOGLER, N, GOEDECKE, T. Flow properties of powdery or granular filling substances of dangerous goods packagings: comparison of the measurement of the angle of repose and the determination of the Hausner ratio. *Packaging Technology and Science*, v. 35, n. 10, p. 765- 782, 2022.

SCHULZE, D. Flow Properties of Powders and bulk solids. Disponível em: www.dietmar-schulze.de/grdle1.pdf. Acesso em: junho 2023.

SEVILLE, J. P. K.; TÜZÜN, U.; CLIFT, R. *Processing of particulate solids*. Ser., IInd Edition, 1997.

SVAROVSKY, L. *Powder testing guide BMHB*. Elsevier Applied Science Powder Testing Guide, BMHB, 1987.

WANG, W.; ZHANG, J.; YANG, S.; ZHANG, H.; YANG, H.; YUE, G. Experimental study on the angle of repose of pulverized coal. *Particuology*, v. 8, p. 482–485, 2010.

ZAALOUK, A. K.; ZABADY, F. I. Effect of moisture content on angle of repose and friction coefficient of wheat grain. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, n. 26, p. 418–42, 2008.

ZHOU, Z. Y.; ZOU, R. P.; PINSON, D.; YU, A. B. Angle of repose and stress distribution of sandpiles formed with ellipsoidal particles. *Granular Matter*, n. 16, p. 695-709, 2014.

YAMANE, K.; TANAKA, T.; TSUJI, Y. DEM and MRI studies of particulate flows in a rotating cylinder. *Energy Resources Engineering*, n. 209, p. 225-228, 1995.



Ângulo de escorregamento de material sólido particulado em caçamba de caminhão

Sliding angle of particulate solid material in truck box

DOI:10.34117/bjdv9n1-173

Recebimento dos originais: 12/12/2022

Aceitação para publicação: 11/01/2023

Evanildo Brandão Batista

Mestrando em Engenharia Mecânica
Instituição: Universidade Santa Cecília (UNISANTA)
Endereço: Rua Oswaldo Cruz, 277, Boqueirão, Santos - SP
E-mail: evanildo.brandao@yahoo.com.br

Aureo Emanuel Pasqualetto Figueiredo

Doutor em Automação Portuária e Segurança do Trabalho
Instituição: Universidade Santa Cecília (UNISANTA)
Endereço: Rua Oswaldo Cruz, 277, Boqueirão, Santos - SP
E-mail: aureo@unisanta.br

Vitor da Silva Rosa

Doutor em Engenharia Química pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Instituição: Universidade Santa Cecília (UNISANTA)
Endereço: Rua Oswaldo Cruz, 277, Boqueirão, Santos - SP
E-mail: victor@unisanta.br

Deovaldo de Moraes Júnior

Doutor em Hidráulica e Saneamento
Instituição: Universidade Santa Cecília (UNISANTA)
Endereço: Rua Oswaldo Cruz, 277, Boqueirão, Santos - SP
E-mail: deovaldo@unisanta.br

RESUMO

A utilização de caminhões basculantes no transporte de materiais sólidos é considerada uma eficiente alternativa utilizada pelas indústrias, porém esse tipo de transporte oferece riscos ao se realizar o descarregamento da carga contida na sua caçamba. A retenção da carga devido a aderência da mesma e a rugosidade da superfície da caçamba são fatores contribuintes para o tombamento da carroceria, resultando em danos físicos e materiais. O presente trabalho teve como objetivo determinar experimentalmente o ângulo de descarregamento completo do minério de ferro e da areia seca grossa e fina em caçambas basculantes em relação ao seu revestimento interno. Para tal, foi desenvolvida uma unidade experimental com o intuito de simular o basculamento. A unidade experimental consistiu em três caçambas de 250 mm de comprimento, 88 mm de largura e 100 mm de altura, com revestimentos metálico, em tinta automotiva e de madeira. A simulação do basculamento se deu por meio de uma plataforma elevatória automática, onde acoplou-se as caçambas, sendo as cargas estudadas em 3 diferentes alturas – 30, 60 e 90mm. As cargas utilizadas foram areia grossa, areia fina e minério de ferro. O método empregado consistiu na alimentação das cargas nas 3 caçambas e nas 3 alturas a fim de se realizar o

seu descarregamento máximo, sem que houvesse solavancos, por meio do aumento constante da inclinação da caçamba. Obteve-se menores ângulos de inclinação e massa retida na caçamba de aço revestido com tinta automotiva, enquanto a caçamba de madeira demonstrou o pior desempenho para todas as cargas e alturas estudadas. Conclui-se que o ângulo de inclinação para o descarregamento total da carga tende a ser menor com o aumento da quantidade de material na caçamba, e que o revestimento aplicado à caçamba exerce uma interação significativa no escorregamento da carga afetado pela rugosidade do revestimento.

Palavras-chave: materiais granulares, caçamba de caminhão, fluxo granular, caminhão basculante.

ABSTRACT

The use of dump trucks to transport solid materials is considered an efficient alternative used by industries, but this type of transport poses risks when unloading the load contained in its bucket. Cargo retention due to its adhesion and the surface roughness of the bucket are contributing factors to the overturning of the bodywork, resulting in physical and material damage. The objective of this work was to experimentally determine the complete unloading angle of iron ore and coarse and fine dry sand in tipping buckets in relation to their internal lining. For this, an experimental unit was developed in order to simulate tipping. The experimental unit consisted of three buckets measuring 250 mm in length, 88 mm in width and 100 mm in height, with metallic, automotive paint and wooden coatings. The tipping simulation was carried out using an automatic lifting platform, where the buckets were coupled, and the loads studied at 3 different heights – 30, 60 and 90mm. The fillers used were coarse sand, fine sand and iron ore. The method employed consisted of feeding the loads into the 3 buckets and at the 3 heights in order to perform their maximum unloading, without any jolts, by constantly increasing the inclination of the bucket. Smaller inclination angles and retained mass were obtained in the steel bucket coated with automotive paint, while the wooden bucket showed the worst performance for all loads and heights studied. It is concluded that the angle of inclination for the total discharge of the load tends to be smaller with the increase of the amount of material in the bucket, and that the coating applied to the bucket exerts a significant interaction in the sliding of the load affected by the roughness of the coating.

Keywords: granular materials, truck bed, granular flow, tipper truck.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil o modo predominante na rede de transporte de carga é o rodoviário, com uma participação de 67,1% (Plano Nacional de Logística, 2021). O Brasil dispõe de uma malha de estradas de aproximadamente 1,7 milhões de quilômetros. A quantidade de caminhões circulantes no Brasil é de 2,052 milhões (CNT Transportation and Logistics Plan, 2018). Toda essa frota em um determinado momento vai precisar descarregar a sua carga e quando se tratar de sólidos particulados surge uma dificuldade, o material pode ter dificuldade de escorregar da caçamba do caminhão.

Em áreas de construção civil e mineração, o transporte de grandes quantidades de matérias sólidas granulares como areia, brita, minérios, além de materiais a granel, é geralmente realizado por caminhões basculantes, que têm como principal característica a capacidade de inclinar suas carrocerias com a finalidade de descarregar a carga transportada por meio da ação gravitacional. O carregamento e descarregamento de sedimentos usando um caminhão basculante é uma das operações mais básicas em um canteiro de obras (Dadhich, 2016).

Um caminhão basculante típico, é constituído por uma caçamba aberta articulada a sua traseira e equipada com um sistema hidráulico que aciona o cilindro hidráulico, ou conjunto de cilindros hidráulicos, de maneira a iniciar a inclinação e, conseqüentemente, o descarregamento da carga.

Os caminhões basculantes se diferenciam dos caminhões comuns devido à necessidade que têm de possuírem um chassi mais curto, mais reforçado e de possuírem uma tomada de força acoplada ao sistema de transmissão a qual é acionada da própria cabine (Jaworski, 2018).

As principais vantagens do emprego deste tipo de caminhão são: versatilidade no transporte de cargas variadas, desde sólidos granulares a madeira, detritos e outros resíduos secos; a praticidade no descarregamento do material, que ocorre sem a necessidade de outras máquinas ou trabalhadores; a grande capacidade de transporte e menor custo.

Essa operação de basculamento oferece riscos ao se realizar o descarregamento da carga contida na sua caçamba, se a carga estiver com dificuldades para escoar o peso poderá se concentrar na parte superior da caçamba inclinada e com isso deslocar o centro de gravidade da caçamba para um ponto mais alto favorecendo um possível tombamento do caminhão. Fatores que podem contribuir com a aderência da carga na caçamba é a rugosidade da superfície da caçamba e quantidade de material sendo transportado, entender o quanto a rugosidade e a quantidade de material influenciam no ângulo de escoamento do material na caçamba foram pilares que motivou esse trabalho. Com o estudo e soluções implementadas visando buscar um revestimento mais adequado para as caçambas de caminhões certamente danos físicos e materiais seriam evitados.

Projetar adequadamente e desenvolver um sistema de revestimento melhor é importante para evitar possíveis tombamentos, diminuir o tempo de descarregamento possibilitando uma otimização na operação e a partir do momento que se evidencia que

um ângulo de 29° é suficiente para o descarregamento total da carga, teremos conseqüentemente um aumento da vida útil do sistema hidráulico que é utilizado para inclinar a caçamba pois não seria exigido do mesmo uma força demasiada. Essas afirmações baseiam-se na compreensão do comportamento do escoamento dos materiais com diferentes revestimentos e quantidades. Desenvolver uma caçamba de caminhão com um revestimento adequado para o tipo de material granular a ser transportado requer o conhecimento de certas variáveis relevantes associadas ao escoamento do material. Essas variáveis irão definir um escoamento do material otimizado para um melhor desempenho e segurança. Para o problema de capotamento do caminhão basculante durante o descarregamento da carga, atualmente existem sensores que garantem o monitoramento em tempo real do ângulo de inclinação e limitam o mesmo inclusive com aviso anti-capotamento da operação de inclinação da caçamba basculante, porém isso implica em um custo adicional que faz com que a grande maioria dos caminhões atualmente não disponham desse tipo de dispositivo anti-tombamento. E uma consideração importante a ser relatada, é que esse equipamento previne e impede o tombamento, mas a carga continua retida no interior da caçamba e dessa maneira não é possível realizar o descarregamento total da carga, então será necessária alguma ação adicional para remover a aderência do material na caçamba do caminhão e desse modo inclinar novamente a carroceria.

A determinação das propriedades do revestimento da parede e, mais importante, das propriedades e fluxo de um material a granel é crítica para o projeto de qualquer sistema de manuseio de materiais a granel. No campo do manuseio de materiais a granel, a adesão pode ser definida como a força de tração para os contatos partícula-partícula e partícula-parede do material a granel (Michael, 2019).

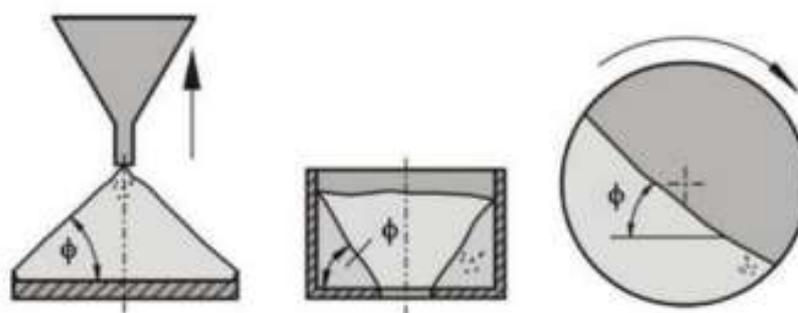
A influência do revestimento da caçamba do caminhão constitui a diferença entre o sucesso e o fracasso da operação de descarregamento do sólido particulado da caçamba do caminhão. A aderência da massa de material que fica nas superfícies da caçamba basculante normalmente é problemática.

O ângulo de escoamento da carga é algo muito complexo porque o descarregamento da carga na caçamba basculante é função de muitos fatores como superfície da caçamba, carga a ser transportada, condições ambientais, condição física e etc

Determinar as relações entre o revestimento utilizado no interior da caçamba, percentual de umidade da carga sendo transportada e a velocidade angular de basculamento, estudando como estes fatores influenciam no ângulo de descarregamento total é de suma importância para essa pesquisa.

O fluxo de pós é definido como o movimento das partículas relativas às partículas vizinhas para criar uma superfície de cisalhamento. Geralmente, o ângulo de repouso é um parâmetro fácil de medir, e fornece uma estimativa aproximada do comportamento coesivo dos pós (Haim, 2021). O ângulo de repouso (AoR) mede o ângulo de inclinação da superfície livre para a horizontal de uma pilha sólida a granel (Ileleji, 2008). Um bom indicador da fluidez do sólido particulado é justamente o ângulo de repouso. As maneiras mais adequadas de medir o ângulo de repouso são ilustradas na Figura 1.

Figura 1 – Medições de ângulo de repouso.



Fonte: Schulze, 2007

Esses parâmetros irão nortear o nosso estudo em relação ao escoamento de material sólido particulado na caçamba de caminhões. Quando um sistema granular responde a uma força motriz que aumenta lentamente, ele pode mudar de uma estrutura estável para um comportamento de avalanche com uma ampla distribuição de tamanhos de avalanche (Susan, 2022).

Esse estudo permite observar e caracterizar a fluidez da areia e do minério de ferro ao escoar de uma caçamba de caminhão. A abundância de materiais granulares e pós que estão sendo usados em várias aplicações faz um uso significativo dos caminhões basculantes para transporte desses materiais.

O material específico utilizado neste trabalho foi areia seca e minério de ferro. A força coesiva específica analisada foi a influência da rugosidade da superfície da

caçamba. Esse trabalho foi realizado utilizando-se um modelo experimental com intuito de simular a operação de basculamento de um caminhão.

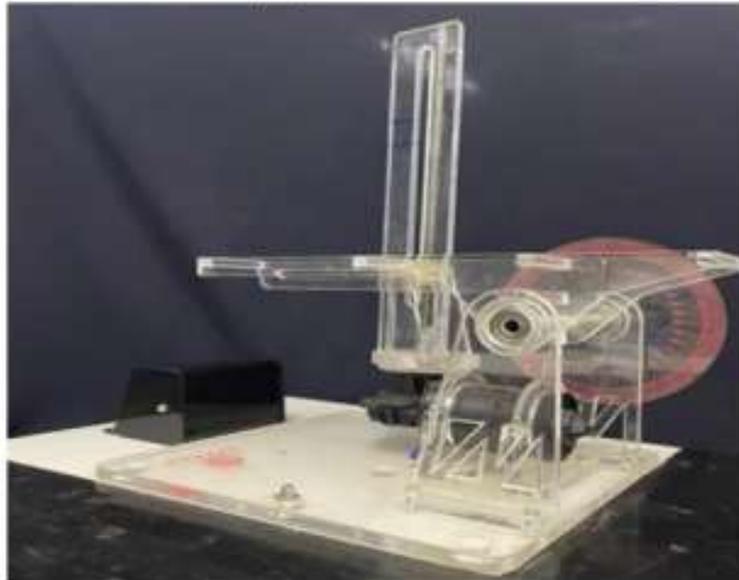
São poucos os dados na literatura referente ao ângulo de escorregamento de material particulado na caçamba de caminhão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais estudados foram: areia fina, areia grossa e Minério de ferro. A realização dos ensaios foi através da unidade experimental desenvolvida no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília.

Apresenta-se na Figura 2 a unidade de bancada de caminhões basculantes montada de maneira a simular a operação de basculamento.

Figura 2 – Unidade experimental montada para descarregamento de caçambas projetado no laboratório de Operações Unitárias na Unisanta



As três caçambas utilizadas na unidade experimental apresentam dimensões de 250 mm de comprimento, 100 mm de altura e 88 mm de largura. Observa-se na Figura 3 o desenho 3D da caçamba.

Os revestimentos utilizados nas caçambas foram: madeira, aço com revestimento de tinta automotiva e aço sem revestimento.

Foram utilizados três sólidos granulares distintos na realização dos ensaios: a) areia grossa seca, com faixa de mesh de 32-42 e b) areia fina seca, com faixa de mesh de 70-100 e c) minério de ferro, com faixa de mesh de 100-140. Foi realizada a análise granulométrica de ambos os materiais, os quais podem ser observados na Figura 4.

Figura 3 – Desenho da caçamba realizado em CAD

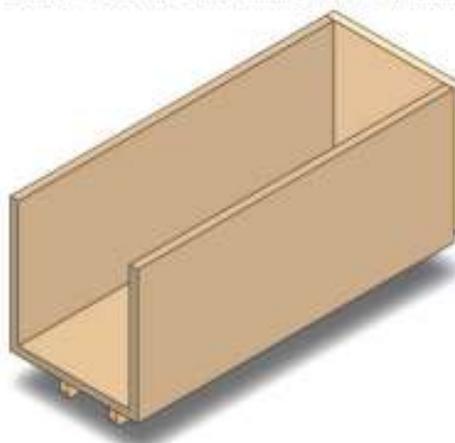
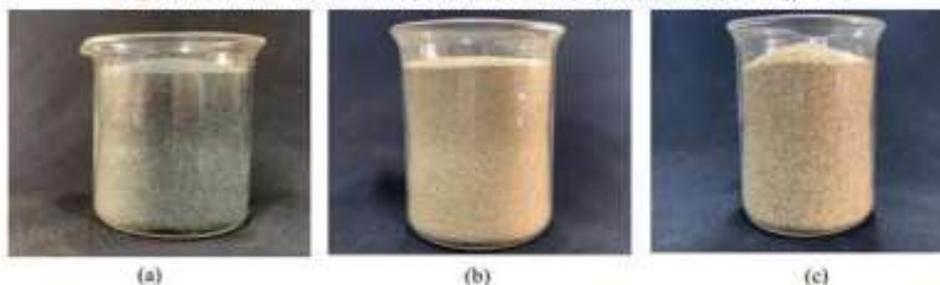


Figura 4 – Materiais estudados: a) Minério de ferro; b) Areia fina; c) Areia grossa



Os ensaios foram realizados na unidade experimental, como apresentado na Figura 1. Utilizou-se dois cronômetros da marca Kikos modelo CR20 – 20 voltas para medição do tempo de escorregamento da carga.

As caçambas foram posicionadas sobre a plataforma elevatória. Por meio do transferidor, assegurou-se que o sistema estivesse nivelado em 0° . Em sequência, iniciou-se o processo de carregamento da caçamba com a carga previamente preparada. Distribuiu-se a carga de maneira homogênea no interior da caçamba, e utilizou-se uma

tampa da caçamba de maneira a impedir o escoamento do sólido depositado e para que ocorresse o preenchimento da caçamba sem a evidência visual de vazamentos.

O descarregamento foi realizado retirando-se cuidadosamente a tampa da caçamba de modo a se obter a menor interferência possível na pilha do material e permitindo que a carga escoasse livremente pela extremidade, até a formação do seu ângulo de repouso característico, que se deu por derramamento. Em seguida, iniciou-se a inclinação da caçamba por meio da partida da unidade localizada no painel de controle da unidade que iniciava a elevação da plataforma. O primeiro passo foi ligar o motor e posicionar a chave seletora para o movimento de subida, neste mesmo instante foi disparado o cronômetro. O aumento da inclinação se deu de forma constante até a ocorrência do descarregamento completo da carga inicialmente presente no interior da caçamba. Então o motor e o cronômetro foram desligados juntos. Após o descarregamento, foi efetuada a leitura do ângulo de inclinação resultante por meio do transferidor acoplado a unidade experimental, como se observa na Figura 5.

Figura 5 –Transferidor acoplado na unidade experimental.



A fim de se realizar a medição da rugosidade superficial dos revestimentos internos das caçambas, foi utilizado o rugosímetro portátil digital, conforme Figura 6.

Figura 6 – Rugosímetro portátil digital



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos da relação entre o ângulo de inclinação em função das caçambas estudadas e matérias-primas por meio dos ensaios com a unidade experimental podem ser observados nas Figura 7 (altura de 30mm), Figura 8 (altura de 60mm) e Figura 9 (altura de 90mm).

Figura 7 – Média das triplicatas dos ângulos de inclinação em função das caçambas para altura de 30mm. Sendo, 1 a caçamba de madeira, 2 a caçamba de aço sem revestimento e 3 a caçamba de aço revestida com tinta.

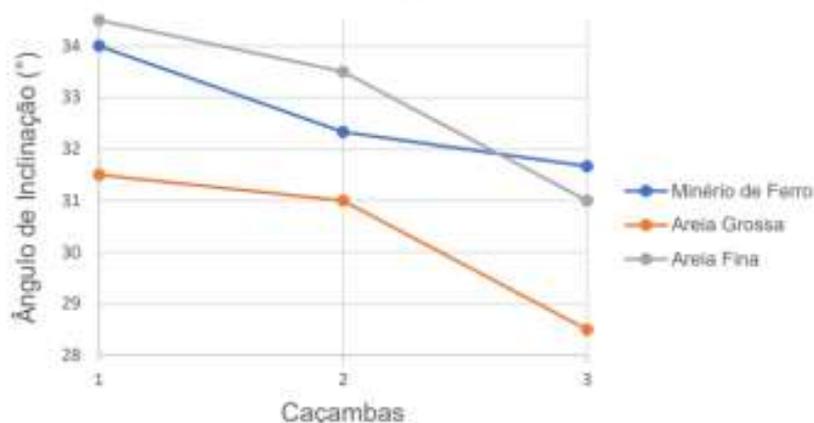


Figura 8 – Média das triplicatas dos ângulos de inclinação em função das caçambas para altura de 60mm. Sendo, 1 a caçamba de madeira, 2 a caçamba de aço sem revestimento e 3 a caçamba de aço revestida com tinta.

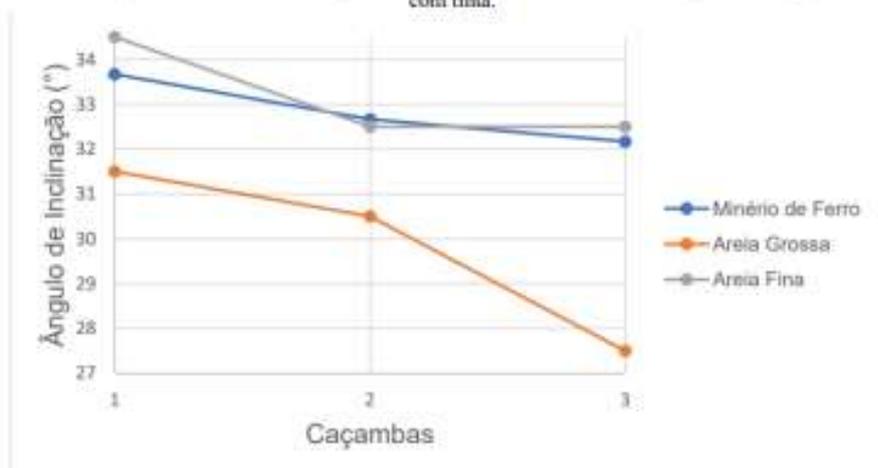
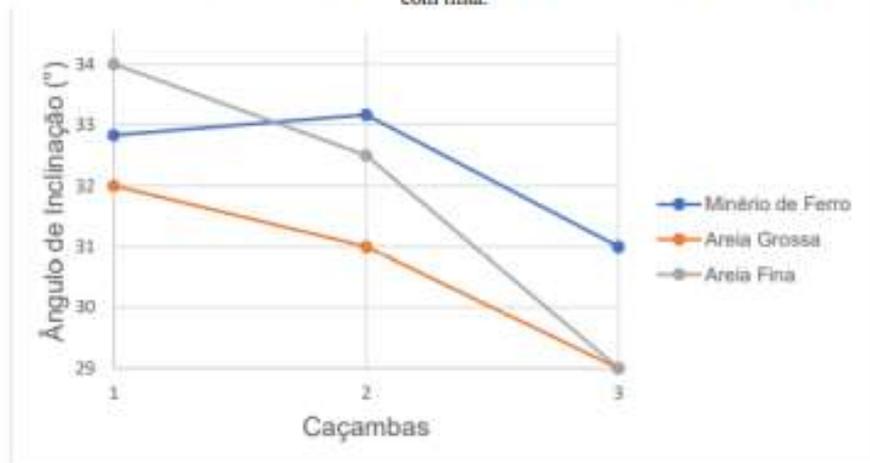


Figura 9 – Média das triplicatas dos ângulos de inclinação em função das caçambas para altura de 90mm. Sendo, 1 a caçamba de madeira, 2 a caçamba de aço sem revestimento e 3 a caçamba de aço revestida com tinta.



Nesta seção, pode-se observar que os experimentos são analisados separadamente de acordo com o material transportado que foram areia fina, areia grossa e minério de ferro e suas respostas em relação ao tipo de revestimento da caçamba. O experimento realizado neste trabalho permite a análise das respostas da areia fina, areia grossa e minério de ferro ao ângulo de inclinação para descarregamento da carga.

Nas figuras 7, 8 e 9 apresentadas são comparadas a fluidez dos materiais particulados com a gama de revestimentos testados na caçamba basculante. Para cada

material, três revestimentos diferentes de caçambas foram testados para avaliar a fluidez do material em função do revestimento da caçamba. Como mencionado acima, cada condição de medição foi repetida três vezes com o mesmo material e revestimento interno da caçamba.

Os resultados experimentais obtidos permitem afirmar que o revestimento interno da caçamba exerce relevante influência no ângulo de inclinação necessário para que toda a carga seja efetivamente descarregada. Um revestimento com uma rugosidade maior diminui a capacidade da carga transportada de fluir durante o basculamento. Percebe-se, também, que o aumento da rugosidade da caçamba causa uma maior aderência do material às superfícies internas da caçamba, tanto laterais quanto inferior, fazendo com que a carga fique parcialmente retida especialmente na parte da caçamba que se encontra mais distante da abertura por onde ocorre o escoamento. Vários parâmetros de rugosidade da superfície foram usados em trabalhos científicos para determinar a relação entre a rugosidade da superfície e a resistência ao deslizamento. (Miklečić, 2021).

Nota-se que, para a areia fina, a média do ângulo de inclinação para descarregamento do material, na altura de 30mm foi de 34,5° na caçamba de madeira enquanto na caçamba de aço revestida com tinta a média foi de 31° para a mesma altura de 30mm o que representa uma redução de 8,7%. Já para o minério de ferro, utilizando também a caçamba basculante com revestimento de tinta o ângulo de inclinação reduziu 6,85% na altura de 30mm comparado com a caçamba de madeira. Na literatura, um experimento físico, a quantidade de material granular ou o número de partículas pode afetar o ângulo de repouso (Al-Hashemi, 2018).

Pode-se observar que a caçamba de madeira foi a que apresentou pior desempenho em relação ao aumento do ângulo de descarregamento total tanto na areia fina, areia grossa e no minério de ferro em todas as alturas analisadas. Nota-se nos gráficos acima que as caçambas de aço sem revestimento e com revestimento são as que demonstraram melhor desempenho em relação ao menor ângulo de descarregamento total na areia fina, areia grossa e no minério de ferro em todas as alturas analisadas.

Os resultados experimentais mostram coerência com estudos anteriores que mostram que o ângulo de repouso diminui com o aumento da quantidade de material (Miura, 1997).

Os resultados apresentados acima são importantes para caracterizar a fluidez dos sólidos particulados areia e minério de ferro com diferentes tipos de revestimentos nas caçambas.

Foram realizadas medições de rugosidade das superfícies das caçambas, obtiveram-se os dados expostos na Tabela 1:

Tabela 1 – Dados dos experimentos com o rugosímetro portátil digital

Revestimento da caçamba	Medição (mm)	Classificação
Aço sem revestimento	1,68	N8
Aço revestida com tinta	0,50	N6
Madeira	3,79	N9

Conforme demonstram as medições realizadas de rugosidade, a caçamba de madeira mostra-se mais rugosa e a caçamba de aço revestida com tinta menos rugosa. Essas medições corroboram que quanto mais rugosa estiver a superfície da caçamba maior será o ângulo para o descarregamento total conforme apresentado nas figuras 7, 8 e 9.

4 CONCLUSÕES

Nesse artigo os ângulos de descarregamento total da carga das caçambas basculantes foram determinados e utilizados para caracterizar a fluidez da areia e do minério de ferro e avaliar o efeito da quantidade de material como carga da caçamba e a rugosidade com diferentes revestimentos de caçambas. As observações experimentais mostram que a quantidade material na caçamba pode afetar no ângulo de inclinação necessário para o descarregamento total da carga e na fluidez do material. De acordo com os resultados obtidos, pode-se afirmar que o aumento da carga presente na caçamba acarreta no geral uma diminuição da inclinação da caçamba para que toda a carga seja escoada.

A superfície interna da caçamba, a qual está em contato direto com a carga, é um fator de relevante importância, mais especificamente a rugosidade da superfície do revestimento visto que influencia especificamente no ângulo de inclinação para o descarregamento total da carga. Pôde-se concluir que caçambas com revestimentos que tenham rugosidade menores requerem um menor ângulo de inclinação na realização do basculamento.

Dentre os revestimentos empregados neste estudo, a caçamba com revestimento de tinta obteve o melhor desempenho para areia fina, areia grossa e minério de ferro onde o ângulo necessário foi de 29° para areia fina, 29° para areia grossa e para minério de ferro um ângulo de 31° atingiu o descarregamento total.

Com base nas conclusões acima para o transporte de areia fina, areia grossa e minério de ferro a caçamba mais indicada é com revestimento de tinta automotiva, independente da quantidade de material transportada.

Trabalhos futuros a serem realizados podem acrescentar outras cargas a serem descarregadas da caçamba de caminhão e variados revestimentos internos na caçamba onde o material a granel é escorregado.

REFERÊNCIAS

- CNT Transportation and Logistics Plan 2018. - Brasília: CNT, 2018.
- Haifeng Lu, Xiaolei Guo, Yong Jin, Xin Gong, Effect of moisture on flowability of pulverized coal, *Chemical Engineering Research and Design*, Volume 133, 2018, Pages 326-334.
- Haim Kalman, Quantification of mechanisms governing the angle of repose, angle of tilting, and Hausner ratio to estimate the flowability of particulate materials, *Powder Technology*, Volume 382, 2021, Pages 573-593.
- Hamzah M. Beakawi Al-Hashemi, Omar S. Baghabra Al-Amoudi, A review on the angle of repose of granular materials, *Powder Technology*, Volume 330, 2018, Pages 397-417.
- JAWORSKI, T. Equipamentos para escavação – compactação e transporte. Curitiba, 2015. Disponível em: Acesso em: 6 nov. 2017.
- K.E. Ileleji, B. Zhou, The angle of repose of bulk corn stover particles, *Powder Tehnology*, Volume 187, Issue 2, 2008, Pages 110-118.
- Kinya Miura, Kenichi Maeda, Shosuke Tok, Method of measurement for the angle of repose of sands, *Soils and Foundations*, Volume 37, Issue 2, 1997, Pages 89-96.
- Michael J. Carr, Alan W. Roberts, Craig A. Wheeler, A revised methodology for the determination of bulk material cohesion and adhesion, *Advanced Powder Technology*, Volume 30, Issue 10, 2019, Pages 2110-2116.
- Miklečić, Josip, Jirous-Rajković, Vlatka, The Relationship between Roughness of Finished Wood Floors and Slip Resistance, *Drvna Industrija*, Issue 72, 2021, Pages 49-56.
- Plano Nacional de Logística PNL 2035, EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA - Brasília, 2021.
- SCHULZE, D. *Powders and Bulk solids: behavior, characterization, storage and Flow*. Germany, Springer, 2007
- Susan Y. Lehman, Lilianna E. Christman, et al. Universal aspects of cohesion, *Granular Matter*, 2022, Article number: 35 (2022).
- S. Dadhich, U. Bodin, U. Andersson, Key challenges in automation of earth-moving machines, *Automation in Construction*, Volume 68, 2016, Pages 212-222

APÊNDICE A2 – Dados obtidos no experimento

Revestimento da Caçamba	Matéria - Prima	Altura (mm)	Ângulo (°)	Massa Escoada (g)	Massa Retida (g)
Madeira	Minério de Ferro	30	33	1343,1	11
Madeira	Minério de Ferro	30	35	1187,0	4
Madeira	Minério de Ferro	30	34	1300,0	7
Madeira	Minério de Ferro	60	33	2991,1	13
Madeira	Minério de Ferro	60	33	2654,0	15
Madeira	Minério de Ferro	60	35	2887,0	7
Madeira	Minério de Ferro	90	33	4262,0	15
Madeira	Minério de Ferro	90	33	4292,0	7
Madeira	Minério de Ferro	90	31	3934,1	17
Madeira	Areia Grossa	30	31	821,0	3
Madeira	Areia Grossa	30	32	833,0	4
Madeira	Areia Grossa	30	32	830,0	3
Madeira	Areia Grossa	60	31	1532,0	2
Madeira	Areia Grossa	60	32	1650,0	2
Madeira	Areia Grossa	60	32	1535,0	2
Madeira	Areia Grossa	90	31	2460,0	4
Madeira	Areia Grossa	90	33	2437,0	2
Madeira	Areia Grossa	90	32	2440,0	3
Madeira	Areia Fina	30	32	780,0	3

Madeira	Areia Fina	30	37	864,0	2
Madeira	Areia Fina	30	34	822,0	3
Madeira	Areia Fina	60	37	1608,0	8
Madeira	Areia Fina	60	32	1577,0	2
Madeira	Areia Fina	60	35	1592,5	5
Madeira	Areia Fina	90	36	2512,0	3
Madeira	Areia Fina	90	32	2382,0	3
Madeira	Areia Fina	90	34	2447,0	3
Aço sem revestimento	Minério de Ferro	30	32	1557,0	10
Aço sem revestimento	Minério de Ferro	30	32	1659,0	13
Aço sem revestimento	Minério de Ferro	30	33	1323,1	13
Aço sem revestimento	Minério de Ferro	60	33	2500,1	23
Aço sem revestimento	Minério de Ferro	60	33	2754,0	6
Aço sem revestimento	Minério de Ferro	60	32	2883,0	12
Aço sem revestimento	Minério de Ferro	90	32	3941,1	59
Aço sem revestimento	Minério de Ferro	90	35	4219,0	4
Aço sem revestimento	Minério de Ferro	90	33	4204,0	26
Aço sem revestimento	Areia Grossa	30	30	768,0	2
Aço sem revestimento	Areia Grossa	30	32	975,0	2
Aço sem revestimento	Areia Grossa	30	31	872,0	2
Aço sem revestimento	Areia Grossa	60	30	1483,0	2
Aço sem revestimento	Areia Grossa	60	31	1567,0	3

ANEXO A

Marca e composição da tinta automotiva

Wandabase HS Wandabase HS



Tinta monocomponente a base de resina poliéster utilizada para sistema de duas ou três camadas, possui secagem rápida e alto poder de cobertura. Reproduz enorme variedade de cores metálicas, perolizadas e lisas, nacionais e importadas, originais de fábrica. Indicado para retoques e repintura geral.



Desengraxante Wanda



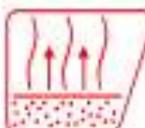
- 2:1
- Cores tricoat, 10% de endurecedor 3093 na camada de efeito, em seguida diluir 2:1



16 - 26 seg



1,3-1,5 mm
1,7 - 2,2 bar na entrada de ar
HVLP máx. 0,6-0,7 bar na câpsula de ar



5 - 10 min.



15 - 20 min para aplicar verniz



Usar proteção respiratória apropriada
AkzoNobel Repintura Automotiva recomenda o uso da máscara respiratória.