



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

ESTUDO DE SIMILARIDADE EM UM CHUTE DE PELOTAS

HERMESON CONCEIÇÃO WANZELER

Tucuruí - PA

2023



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

ESTUDO DE SIMILARIDADE EM UM CHUTE DE PELOTAS

HERMESON CONCEIÇÃO WANZELER

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título bacharel em Engenheiro Mecânico.

**Orientador:
Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita**

Tucuruí - PA

2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

W244e Wanzeler, Hermeson.
Estudo de similaridade de um chute de pelotas / Hermeson
Wanzeler. — 2023.
96 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
Coorientador(a): Prof. Me. Arthur dos Reis Lemos Fontana
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de
Engenharia Mecânica, Tucuruí, 2023.

1. Pelotas. 2. Similaridade. 3. Chute De Transferência. 4.
Simulação. 5. Minério. I. Título.

CDD 620.0042



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DE SIMILARIDADE EM UM CHUTE DE PELOTAS

HERMESON CONCEIÇÃO WANZELER

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de
Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof/ Dr. André Luiz Amarante Mesquita
FEM/CAMTUC/UFPA

Membro Interno: Prof. Danilo Silva Santos
FEM/CAMTUC/UFPA

Membro Externo: Eng. Me. Arthur dos Reis Lemos Fontana
FluidPar/TECNOLAGO/UFPA

Conceito: EXCELENTE

Tucuruí, 24 de fevereiro de 2023.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu pai Genivaldo, minha mãe Maria do Livramento e minha avó, que sempre estiveram presentes em minha vida, me apoiando e me encorajando a perseguir meus objetivos. Sem o amor, o incentivo e os ensinamentos que recebi deles, este trabalho não seria possível. A eles, dedico este trabalho com todo o meu coração e agradeço por serem minha fonte de inspiração.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de dedicar este trabalho a todas as pessoas que fizeram parte da minha trajetória acadêmica e profissional. Desde o início, muitas pessoas foram fundamentais sempre me incentivaram e não deixaram eu desisti, com isso para o meu desenvolvimento e crescimento, e eu gostaria de expressar minha gratidão eterna a cada uma delas.

Em primeiro lugar, quero agradecer a minha irmãs, aos meus pais, Genivaldo e Maria do Livramento, e à minha avó, Maria Barrada, por todo o amor, apoio e incentivo que me deram ao longo dos anos. Seus ensinamentos, sacrifícios e crença em mim me permitiram alcançar essa conquista, e sou profundamente grato por tudo isso.

Também quero agradecer à Universidade Federal do Pará e aos seus funcionários por me proporcionarem a oportunidade de estudar em um ambiente de excelência e crescer academicamente. Em particular, quero agradecer aos meus professores de graduação, Jessé Padilha, Walter Santos, Danilo Santos, Maciel Furtado, Ayrton José, Artur Cunha, Ezequiel Belo, Bruno Wallace, Ronaldo Raposo, Douglas Garcia, Leopoldo Bastos e Walber. Seus ensinamentos foram fundamentais para a construção do conhecimento e das habilidades necessárias para a conclusão deste trabalho.

Além disso, gostaria de agradecer em especial ao professor André Mesquita, por sua orientação, paciência e sabedoria, que foram essenciais para a realização deste trabalho. Sua contribuição como chefe de estágio e coordenador do projeto com parceria a Vale e o FluidPar, me proporcionou a oportunidade de desenvolver minhas habilidades de pesquisa e contribuir significativamente para este trabalho.

Também quero agradecer aos meus amigos de classe de Mec 18, Claudio Fernando, Odinaldo DJ, em especial a Ryan Louzada e Alex Lopez, que foram parceiros e companheiros de jornada acadêmica, e a todos os demais amigos e colegas que fizeram parte dessa trajetória. Aos meus amigos de trabalho, Arthur Fontana, Danilo Santos, Vinicius Serrão, Maycon Castro e Davi Sales, Pedro Henrique, Paulo Henrique, Jonatas Cruz, Danielle Baia, Madalena Silva e Daniela Baena, agradeço por sua amizade e apoio, que tornaram minha rotina mais leve e agradável. É claro que não podia esquecer das pessoas que fazem a nossa segurança em nosso ambiente de trabalho arriscando suas vidas, um dia e um cara chamado Cássio e alternando com um cara chamado Rodrigo.

Por fim, quero agradecer a Dani Baia, minha grande amiga e companheira, por sua confiança e apoio sempre que preciso. E, é claro, aos meus amigos que conquistei ao longo da vida, em especial a Fabex e Falstex, por suas companhias agradáveis, histórias e aventuras

compartilhadas, mesmo que às vezes pareçam com umas histórias meio difícil de acreditar, tipo história de pescador, mas são gente boa demais. Também tem o Nestor que as vezes some e aparece do nada.

Este trabalho é dedicado a todos vocês que me ajudaram a superar desafios, acreditar em mim mesmo e a conquistar meus objetivos. Obrigado por me apoiar e me encorajar sempre. Que esta dedicação seja um sinal de minha gratidão e do meu respeito a cada um de vocês.

"O soldado acima de todos é um cidadão. Devemos criar em nossas mentes a imagem de um soldado melhor, mais bem educado e mais completo: um cidadão de valor inestimável"
(George S. Patton)

ESTUDO DE SIMILARIDADE EM UM CHUTE DE PELOTAS

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise dimensional e de similaridade de um chute de transferência de pelotas queimadas para reprodução do mesmo em escala laboratorial, utilizando simulação numérica utilizando o método dos elementos discretos – DEM (Discrete Element Method) para analisar o escoamento do material granular no chute. O estudo se inicia com a apresentação do processo de produção de pelotas, desde do beneficiamento passando pelotamento, queima e estocagem, além do processo e objetivo do recobrimento das pelotas com glicerina e bauxita. Em seguida, são apresentados os objetos de estudos que são os transportadores de correia que e a base para condição da análise e o chute de transferência, que e o objeto a ser redimensionado em escala menor, logo são apresentados os principais componentes e partes constituintes de ambos. O dimensionamento e a similaridade para o chute são apresentados seguindo as condições e as teorias para o mesmo. Logo temos as propriedades do material granular descrito, que e útil para que aconteça a análise numérica, e temos os ensaios de como eles foram realizados e a metodologia para caracterização do material. O software Bulk Flow Analyst é discutido, bem como suas simulações de caracterização de materiais e análise de escoamento do sólido granular. Como resultado temos a análise do protótipo em escala e real com a observação do fluxo na simulação numérica DEM realizada, os resultados indicam a eficácia do chute de transferência no transporte de pelotas queimadas.

Palavras-chave: *Pelotas de Minério de Ferro, Similaridade, Chute de Transferência, Método dos Elementos Discretos*

SIMILARITY STUDY IN A PELLET CHUTE TRANSFER

ABSTRACT

This paper presents a dimensional and similarity analysis of a burnt pellet transfer chute for reproduction at a laboratory scale, using numerical simulation through the Discrete Element Method (DEM) to analyze the flow of granular material in the chute. The study begins with the presentation of the pellet production process, from beneficiation to pelletizing, burning, and storage, as well as the process and purpose of coating the pellets with glycerin and bauxite. Next, the study objects are presented, which are the conveyor belts that form the basis for the analysis condition, and the transfer chute, which is the object to be downsized to a smaller scale, followed by the presentation of the main components and constituent parts of both. The dimensional analysis and similarity for the chute are presented following the conditions and theories for it. Then we have the description of the granular material properties, which is useful for the numerical analysis, and the description of how the tests were carried out and the methodology for material characterization. The Bulk Flow Analyst software is discussed, as well as its simulations of material characterization and analysis of granular solid flow. As a result, we have the analysis of the prototype at a real and laboratory scale with the observation of the flow in the DEM numerical simulation performed, the results indicate the effectiveness of the transfer chute in the transport of burnt pellets.

Keyword: *Iron Ore Pellets, Similarity, Transfer Chute, Discrete Element Method.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Fluxo do processo do beneficiamento de Minério.	20
Figura 2. Fluxo do processo das pelotas.	21
Figura 3. Pelotas de ferro queimadas.	22
Figura 4. Fluxograma do processo final das pelotas.	23
Figura 5. <i>Clusters</i> em reatores de fornos.	25
Figura 6. Transportador de correia.	26
Figura 7. Componentes de TC.	27
Figura 8. Composição da correia.	28
Figura 9. Tipos de roletes.	29
Figura 10. Típico tambor de aço.	29
Figura 11. Tipos de tambor.	30
Figura 12. Tipos de esticadores.	31
Figura 13. Bancada de transportadores de correia em chute de transferência.	32
Figura 14. Laboratório de formação de pilhas.	32
Figura 15. Correia Superior.	33
Figura 16. Correia inferior.	33
Figura 17. Chute de transferência.	34
Figura 18. Chute e suas partes constituintes.	35
Figura 19. Caixa de pedra de um chute.	36
Figura 20. Fluxo de material na caixa de pedra.	37
Figura 21. Chapas de desgaste.	38
Figura 22. Bota.	38
Figura 23. Porta de inspeção localizada no módulo superior.	39
Figura 24. Guias laterais.	39
Figura 25. Guias com chapas de desgaste.	40
Figura 26. Caixa de fluxo de grande porte (<i>Big Box</i>).	50
Figura 27. Caixa de fluxo em escala.	50
Figura 28. Placas defletoras.	51
Figura 29. Ensaios de pelotas na defletora 90°.	52
Figura 30. Ensaios de pelotas na defletora 20°.	52
Figura 31. Fluxo grama do processo de simulação BFA.	54
Figura 32. Tela principal Bulk Flow Analyst™.	55

Figura 33. Aba <i>Project</i>	55
Figura 34. Aba <i>Components</i>	56
Figura 35. Reconhecimento dos componentes pelo BFA.	57
Figura 36. Aba <i>Components</i> inserindo componentes.	58
Figura 37. Aba <i>Simulations</i>	59
Figura 38. Aba <i>Run Manager</i>	60
Figura 39. Caixa de fluxo.	61
Figura 40. Ângulo drenado de 90°.	61
Figura 41. Ângulo de repouso de 90°.	62
Figura 42. Ângulo drenado de 20°.	62
Figura 43. Ângulo de repouso 20°	62
Figura 44. Chute de pelotas real.	64
Figura 45. Comparação do chute do protótipo para o modelo.	67
Figura 46. Capota.	68
Figura 47. Módulo intermediário.....	68
Figura 48. Bota.	68
Figura 49. Montagem do modelo chute.....	69
Figura 50. Suporte para o chute.....	69
Figura 51. Correia inferior com base ajustável.	70
Figura 52. Montagem completa do chute de recobrimento de pelotas.....	70
Figura 53. Simulação BFA chute real.	71
Figura 54. Simulação BFA chute modelo.	71
Figura 55. Vista completa simulação BFA modelo.....	72
Figura 56. Simulação DEM em modelo com a contagem de partículas.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Ângulos de calibração da Pelota.....	63
Tabela 2. Dados de calibração da Pelota	63
Tabela 3. Dados técnicos do projeto real.....	65
Tabela 4. Tabela de parâmetros de escala	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FLUIDPAR – Laboratório de fluidodinâmica e particulados.

UFPA – Universidade Federal do Para.

CamTuc – Campus de Tucuruí.

DEM - Discrete Element Method (Método dos Elementos Discretos).

TC – Transportador de correia.

PVC – policloreto de vinila.

CV – Cavalo-vapor.

NBR – Norma brasileira regulamentadora.

NBR NM – Norma brasileira norma Mercosul.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

BFA - Bulk Flow Analyst.

NDPLE – Numero de partículas lado esquerdo.

NDPLD – Numero de partículas lado Direito.

mm – Milímetros.

kg - Quilo gramas.

m – Metro.

s – Segundos.

h – hora.

t – Tonelada.

s/u – Sem unidades.

LISTA DE SÍMBOLO

\dot{m} – Taxa de fluxo de massa.

ρ – Densidade.

g – Aceleração da gravidade.

D – Diâmetro da partícula.

l – Comprimento característico.

λ – Fator de escala.

v – Velocidade da correia.

α – Ângulo de repouso.

S_f – Fator de forma da partícula.

C – Capacitância.

l_p – Comprimento característico projeto.

l_M – Comprimento característico Modelo.

v_M – Velocidade da correia do modelo.

v_p – Velocidade da correia do protótipo.

Q_M – Vazão do modelo.

Q_p – Vazão do protótipo.

ρ_b – Densidade aparente do material granular.

ϕ – ângulo de repouso.

w – Umidade.

% - Por cento.

m^3 – Metro cubico.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVO.....	18
1.1.1 Objetivo geral	18
1.1.2 Objetivo específicos	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 PROCESSO DAS PELOTAS.....	18
2.1.1 Beneficiamento do minério de ferro	19
2.1.2 Mistura e pelotamento	20
2.1.3 Queima e consolidação final	22
2.2 RECOBRIMENTO DE PELOTAS.....	23
2.2.1 Aplicação de glicerina	23
2.2.2 Aplicação de bauxita	24
2.3 TRANSPORTADOR DE CORREIA (TC).....	26
2.3.1 Principais componentes	26
2.3.1.1 <i>Correia</i>	27
2.3.1.2 <i>Roletes</i>	28
2.3.1.3 <i>Tambor</i>	29
2.3.1.4 <i>Esticador</i>	30
2.3.2 Laboratório de estudos em transportadores de correia	31
2.4 CHUTE DE TRANSFERÊNCIA.....	34
2.4.1 Componentes de um chute	35
2.4.1.1 <i>Módulos</i>	35
2.4.1.2 <i>Caixa de pedra</i>	36
2.4.1.3 <i>Chapas de desgaste</i>	37
2.4.1.4 <i>Bota</i>	38
2.4.1.5 <i>Porta de inspeção</i>	39

2.4.1.6 Guias.....	39
2.5 SIMILARIDADE PARA CHUTE EM ESCALA.....	40
2.5.1 Condições de similaridade.....	41
2.5.2 Teorema de Buckingham-Pi.....	42
2.5.3 Similaridade para TC e chute.....	44
2.6 PROPRIEDADES DE MATERIAIS GRANULARES.....	46
2.6.1 Densidade real do material granular (ρ_b).....	46
2.6.2 Densidade aparente do material granular (ρ_s).....	47
2.6.3 Ângulo de Repouso do material granular (ϕ).....	48
2.6.4 Granulometria.....	48
2.6.5 Umidade (w).....	49
2.7 ENSAIOS NA CAIXA DE FLUXO REDUZIDA.....	49
2.8 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DEM.....	53
2.8.1 bulk flow analyst™.....	53
2.8.1.1 Apresentação do software.....	53
2.8.1.2 Calibração do modelo DEM.....	60
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	64
3.1 CHUTE ABORDADO.....	64
3.2 ANÁLISE DE SIMILARIDADE DO CHUTE.....	65
3.3 PROJETO DO CHUTE EM ESCALA.....	67
3.4 SIMULAÇÃO DEM.....	71
4 CONCLUSÃO.....	73
4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
REFERÊNCIAS.....	75
APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO.....	79
APÊNDICE B – PROJETO DO CHUTE DE TRANSFERÊNCIA DE PELOTAS.....	83
APÊNDICE C – PROJETO DO SUPORTE DO TC INFERIOR.....	89

ANEXO A – TRANSPORTADOR DE CORREIA SUPERIOR	93
ANEXO B – TRANSPORTADOR DE CORREIA INFERIOR	94

1 INTRODUÇÃO

O transporte de materiais granulares é uma atividade crítica na indústria de mineração, sendo necessário garantir que os materiais sejam transferidos de um ponto a outro com eficiência e segurança. Segundo Baskar *et al.* (2013) o transporte de materiais granulares em chutes de transferência é um processo complexo que envolve uma série de fatores, incluindo a caracterização dos materiais, a geometria do chute, a dinâmica das partículas e a interação com as superfícies do chute. Nesse contexto, a análise dimensional e de similaridade tem sido amplamente utilizada para otimizar processos de transporte de materiais granulares.

A análise dimensional e de similaridade é uma técnica que permite avaliar a transferibilidade de um determinado material granular em diferentes sistemas de transporte. De acordo com Cundall e Strack (1979) a análise de similaridade é baseada no princípio de que a dinâmica das partículas em diferentes sistemas de transporte é semelhante se as dimensões e as propriedades físicas dos materiais forem escalonadas adequadamente. A utilização de simulações numéricas, como a Dinâmica dos Elementos Discretos (DEM), é uma ferramenta poderosa para a análise dimensional e de similaridade de sistemas de transporte de materiais granulares.

O objetivo de realizar uma análise dimensional e de similaridade de um chute de transferência de pelotas queimadas, com o uso do *software Bulk Flow Analyst* e simulação DEM. A produção de pelotas é um processo complexo que envolve diversas etapas, como a queima, estocagem e recobrimento com glicerina e bauxita. Durante o transporte das pelotas, é necessário transferi-las de um transportador para outro por meio de um chute de transferência onde pode ser incluído o recobrimento das pelotas. No entanto, o transporte de pelotas queimadas pode ser desafiador devido a diversas questões relacionadas à caracterização dos materiais granulares, pois como exemplo a densidade aparente no material pode mudar de acordo com a umidade presente isso impacta na dinâmica das pelotas e geometria do chute de transferência pois pode haver o entupimento e o derramamento do material.

Este estudo tem como objetivo contribuir para o desenvolvimento de técnicas e metodologias para otimização de processos de transporte de materiais granulares na indústria de mineração, em consonância com as demandas atuais por sustentabilidade, segurança e eficiência. Além disso, os resultados obtidos podem ser úteis para o aprimoramento de chutes de transferência utilizados na transferência de outros tipos de materiais granulares em diferentes setores, já que a reprodução em escala laboratorial pode ser realizados teste práticos.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo geral

Dimensionar um chute de transferência de pelotas em escala laboratorial utilizando análise dimensional e de similaridade, e analisar o fluxo de material utilizado o método numérico, para realização de experimentos científicos e acadêmicos no laboratório de fluidodinâmica e particulados (FuidPar), no campus da Universidade Federal do Pará (UFPA) no campus de Tucuruí (CamTuc), estando a disposição para realização de ensaios no chute de transferência, transportadores de correias, tendo em vista experimento prático aos pesquisadores.

1.1.2 Objetivo específicos

- Dimensionar o chute de pelotas em escala laboratorial.
- Realizar a análise de escoamento do material em método numérico DEM.
- Realizar o estudo dimensional e análise de similaridade.
- Mostrar o fluxo de material no chute em escala.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO DAS PELOTAS

Minério com partículas menores foi deixado para se acumular em pilhas que careciam de qualquer propósito real. Como resultado, o desenvolvimento de novos processos metalúrgicos era imperativo. Esses processos incluíam sinterização e briquetagem. Esses procedimentos resultaram na utilização desses materiais como subproduto (FONSECA e CAMPOS, 2018).

A pelotização é um processo de compactação de minérios finos em pelotas sólidas com o objetivo de melhorar seu manuseio, armazenamento e transporte, Pontes (2020) realizou pesquisas em que diz comenta sobre os processos da pelota, comenta que extrair blocos de rocha contendo minério de ferro, que passam por diferentes processos, onde muito simplesmente são britados para reduzir o seu tamanho, e peneirados, dos quais separação de minério granulado (material granular entre 0,6 e 5 cm de diâmetro), *sinter-feed* (partículas mais finas de até 0,6 cm de diâmetro), *pellet-feed* (fração ultrafina) minério de ferro, com diâmetro médio inferior a 0,015 cm) e rejeitos. Voltando após o beneficiamento, o minério separado é

armazenado em diferentes pilhas, neste momento o processo de beneficiamento terminará e dará seu destino final. Processo de pelletização é composto por várias etapas, que incluem:

- **Preparação de minérios:** Os minérios são lavados, secos e classificados para remover impurezas e materiais indesejados. Em seguida, são moídos em pó fino para aumentar a superfície e melhorar a adesão durante o processo de pelletização;
- **Adição de aditivos:** O pó de minério é misturado com um aditivo, geralmente água ou um agente *binder*, para ajudar a manter as pelotas unidas;
- **Formação de pelotas:** O material misturado é comprimido e moldado em pelotas usando uma prensa de pelletização. A pressão e a temperatura são controladas para garantir que as pelotas tenham a forma desejada e sejam firmes o suficiente para suportar o manuseio e o transporte;
- **Secagem:** As pelotas recém-formadas são secas para remover a umidade excessiva.
- **Aquecimento:** As pelotas são aquecidas em fornos para endurecê-las e melhorar sua resistência mecânica e durabilidade;
- **Armazenamento:** As pelotas são armazenadas para o transporte ou para o uso posterior em processos industriais, como a siderurgia.

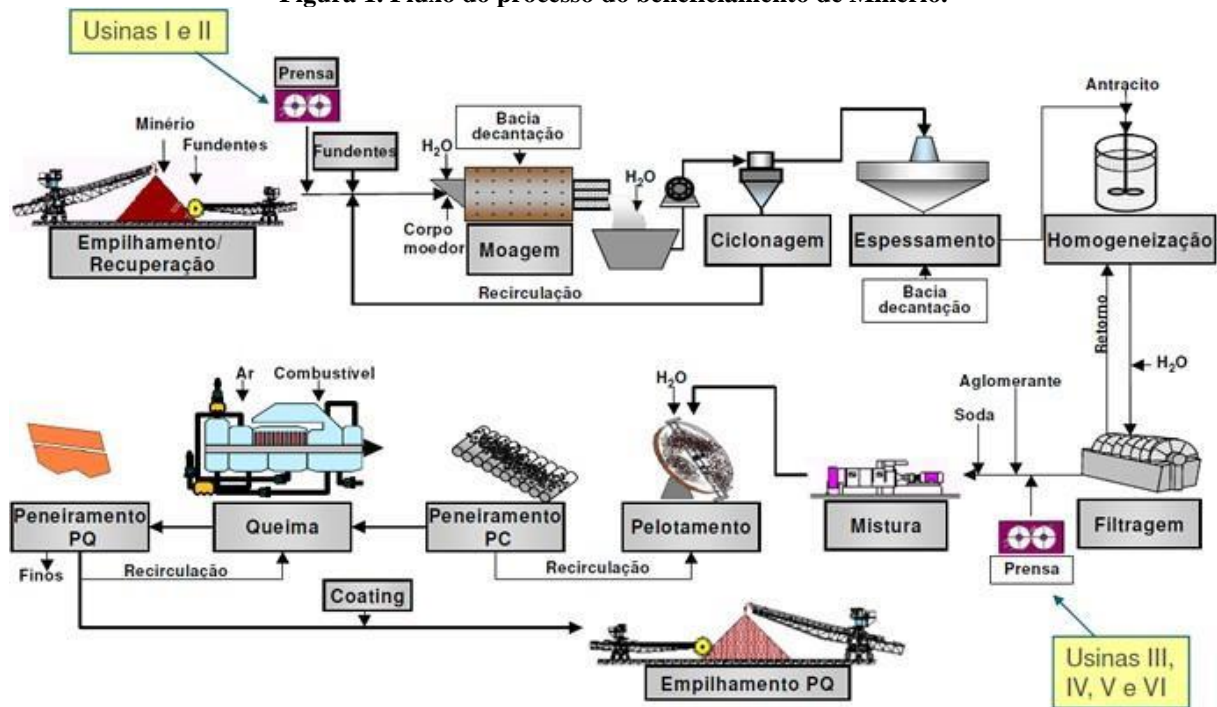
Segundo Mourão (2017) independente do processo para pelletização acabam tendo os mesmos estágios de processo para a produção da pelota. Para a produção são eles os estágios: Beneficiamento do minério, mistura para pelletamento e a queima e consolidação final.

Este processo varia de acordo com o tipo de minério e as especificações do produto final, mas a maioria das etapas descritas acima são comuns aos processos de pelletização. Alguns tipos de pelletização também podem usar aditivos químicos para melhorar a qualidade das pelotas.

2.1.1 Beneficiamento do minério de ferro

O processamento do *pellet feed* é necessário de atingir a granulometria necessária para formar pelotas verdes, na próxima etapa, conforme fluxograma da Figura 1, onde são mencionadas três etapas principais que são: moagem a úmido, pelletamento com discos e forno de queima.

Figura 1. Fluxo do processo do beneficiamento de Minério.



Fonte: Vale (2020).

De acordo com Mourão (2017) diz que em geral, superfícies específicas na faixa de 1.7 a 2.2 cm^2/g e granulometria abaixo de 0,074 mm são necessárias para a formação de pelotas brutas, nos discos de pelletização. Para que essas condições sejam alcançadas, o minério é submetido ao processamento de moagem. Normalmente, o *pellet feed* concentrado não atende a essas especificações. A moagem a seco ou úmido em moinhos de bolas pode ser utilizada para cominuição, dependendo do tipo de minério e das condições existentes no local da usina de pelletização. A moagem é uma operação com custo elevado, tanto em termos de energia quanto de outros insumos.

2.1.2 Mistura e pelletamento

A mistura para pelletização é composta principalmente de minérios de ferro finamente moídos e um aditivo, geralmente água ou um agente *binder*, que ajuda a manter as pelotas unidas. Os aditivos são adicionados ao pó de minério para ajudar a formar as pelotas e melhorar sua resistência mecânica (MOURÃO, 2017).

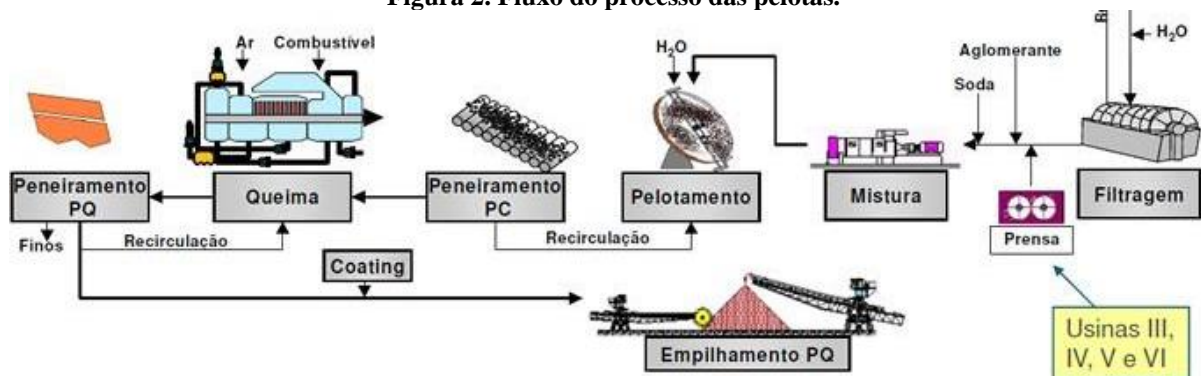
A quantidade de aditivo varia de acordo com a qualidade do minério e as especificações da pelota desejada. Alguns tipos de pelletização também podem usar aditivos químicos, como cimento ou coque, para melhorar a qualidade das pelotas. A mistura é uniformemente misturada para garantir que seja consistente e depois comprimida e moldada em pelotas usando uma

prensa de pelotização. O processo de formação de pelotas é controlado cuidadosamente para garantir que as pelotas tenham a forma e a densidade desejadas (TAKANO *et al.*, 2017).

Segundo Takano *et al.* (2017) a mistura para pelotização é uma parte crítica do processo de pelotização, pois afeta diretamente a qualidade das pelotas produzidas e, conseqüentemente, a qualidade do aço produzido a partir delas. Por isso, é importante usar minérios de alta qualidade e aditivos controlados para garantir a produção de pelotas de alta qualidade.

De acordo com Mourão (2017) uma vez obtido o minério fino, a dosagem de ligante, fundente e combustível sólido final é feita por moagem e filtragem conforme mostrado na Figura 2 para produzir as pastilhas de combustão especificadas. Fluxos são importantes para ajustar a basicidade das pelotas, conferindo-lhes propriedades químicas, físicas e metalúrgicas adequadas para uso em reatores de redução de aço.

Figura 2. Fluxo do processo das pelotas.



Fonte: Adaptado de Vale (2020).

Preferencialmente, os aditivos devem ser manuseados separadamente e adicionados ao minério na entrada do misturador. No entanto, cada fábrica produz à sua maneira, dependendo das condições locais e da disponibilidade de matéria-prima. Em algumas fábricas, fundentes são adicionados às pilhas de minério de ferro e moídos juntos.

Após filtrar e adicionar aditivos, se necessário, ajustar o teor de umidade da mistura para granulação. O material é enviado para um misturador e depois para a granulação. Discos ou tambores podem ser usados para produzir pelotas verdes (*green pellets*) (MOURÃO 2017). Devido à sua simplicidade, os discos de partículas são os mais comumente usados. O tamanho das partículas da matéria-prima pode ser ajustado pelas variáveis de controle na operação, tais como: taxa de produção, ângulo de inclinação, velocidade do disco, etc. Antes de entrar no forno, os grânulos crus são peneirados para a retirada de partículas finas e grossas, que são recicladas no processo (MOURÃO 2017).

2.1.3 Queima e consolidação final

Segundo Mourão (2017) para aumentar as pelotas com força, propriedades metalúrgicas adequadas são desejadas nas pelotas brutas, estas são submetidas a altas temperaturas (1250-1350 °C) em fornos convenientes e rigorosamente controlados. Esses fornos possuem diferentes seções, em cada uma das quais ocorre o processo de secagem, pré-aquecimento, queima e resfriamento do produto. Os caudais de subida e descida, temperatura e pressão, são regulados em cada zona do forno, dependendo do tipo de *pellet* produzido. Os gases quentes das zonas de resfriamento são recirculados, o que permite a recuperação de parte do calor, o que aumenta a eficiência térmica dos fornos.

Costa (2008) diz que o produto do processo de pelletização, obtêm-se pelotas queimadas com propriedades físicas, químicas e metalúrgicas adequadas, destinadas ao processamento metalúrgico em altos-fornos e reatores de redução direta, em comparação com o sinter e o minério, que são utilizados como partículas dominantes, destacando-se sua alta resistência física, alta metalização, boa porosidade e uniformidade dimensional.

A etapa final de produção da pelota consiste em uma etapa breve, na qual a temperatura vai sendo reduzida e o calor vai se espalhando entre as pelotas até que todas adquiram a mesma temperatura. O resfriamento das pelotas ocorre através de fluxos intensos de ar atmosférico em temperatura ambiente ou mergulhadas em líquido de arrefecimento, a fim de possibilitar o transporte (MOURÃO 2017). As pelotas finais tem granulometria final de 5 a 15 mm de diâmetro, sua aparência pode ser vista na Figura 3 apresentado a seguir.

Figura 3. Pelotas de ferro queimadas.



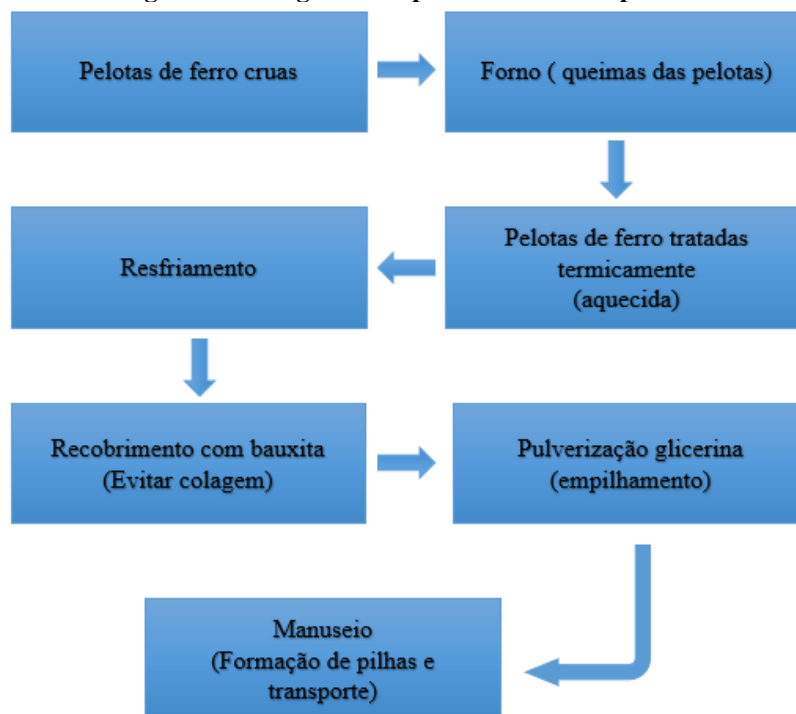
Fonte: Autoria própria (2023).

2.2 RECOBRIMENTO DE PELOTAS

O recobrimento das pelotas serve para proteger as pelotas de danos, degradação, controle de poeira durante transporte e o armazenamento e evitar a colagem das pelotas nos altos-fornos. O recobrimento de pelotas de minério de ferro com glicerina e bauxita é uma técnica recente que tem despertado o interesse da indústria siderúrgica. Segundo um estudo realizado por Pal *et al.* (2021) o uso de glicerina e bauxita na mistura de recobrimento pode melhorar significativamente a resistência mecânica das pelotas e reduzir a formação de finos durante o transporte e o manuseio.

O processo final das pelotas onde ela recebe os recobrimentos de pós queima pode ser observado no diagrama de fluxo apresentado na Figura 4, em que a maneira como são aplicados os produtos de recobrimento um acaba interferindo um ao outro, assim prejudicando o controle do recobrimento final. Em resumo, o recobrimento das pelotas é importante para garantir que a matéria-prima chegue às usinas siderúrgicas em boas condições e pronta para ser utilizada na produção de aço, com a emissão de poeira mínima possível no transporte (ALENCAR, 2021).

Figura 4. Fluxograma do processo final das pelotas.



Autor: Autoria própria (2023).

2.2.1 Aplicação de glicerina

A aplicação de glicerol (também conhecido como glicerina) nas pelotas pode ser feita com o objetivo de melhorar a qualidade. Algumas das razões para a aplicação de glicerol nas é

principalmente o controle de poeira, a adição de glicerol pode ajudar a reduzir a geração de poeira durante o processamento e o transporte, o que pode melhorar a segurança no local de trabalho e a qualidade do ar (ALENCAR, 2021).

Segundo a VALE S/A (2019) que criou uma patente onde ela trabalha “Processo de inibição de emissão de particulados durante atrito de pelotas de minério de ferro tratadas termicamente”, em que a invenção utiliza a glicerina é fornecer um método de utilização de um eficiente inibidor de emissão de particulados aplicável a pelotas, granulados, finos e outros produtos derivados do minério de ferro, bem como de outros minerais, que reduz significativamente a emissão de particulados e tem um efeito de longo prazo durante o manuseio, empilhamento, carga e descarga desses produtos. E fornecer um processo para inibir a liberação de particulados em atrito entre pelotas de minério de ferro aquecidas, isso é feito por aspersão de um derivado alcoólico sobre o minério de ferro.

A aplicação de glicerol pode ajudar a melhorar a qualidade dos pelotas, controlar a umidade, melhorar a fluidificação, reduzir a poeira e garantir que a matéria-prima chegue às usinas siderúrgicas em boas condições. Segundo Alencar (2021) é importante destacar que o tipo e a quantidade de glicerol a ser adicionado dependem das especificações do produtor e do usuário final, e devem ser determinados por ensaios e testes rigorosos antes de serem implementados em larga escala.

A VALE S/A (2019) realizou teste experimentais onde comprovaram a eficiência da aplicação de glicerina nas pelotas após a saída do forno em que tiveram os resultados dos exames laboratoriais indicaram uma diminuição na quantidade de emissão de particulados que foi da ordem de 500 mg/m³ a 100 mg/m³ após a aplicação da glicerina. Essas descobertas foram derivadas de um aumento de 500 g por tonelada de pelotas aquecidas. Como resultado, descobriu-se que a glicerina é um produto que reduz a emissão de particulados quando aplicada em pelotas de minério de ferro. Os resultados também indicaram que a glicerina pode ser utilizada em larga escala para suprimir as emissões de partículas durante a movimentação de pelotas, durante o empilhamento, carregamento e descarregamento.

2.2.2 Aplicação de bauxita

A aplicação da bauxita tem como objetivo evitar a colagem das pelotas nos fornos de produção, a busca pelo aumento da produtividade na redução direta levou à criação de métodos que aumentam a cinética da redução, sendo o exemplo mais notável o aumento da temperatura do forno (ALENCAR, 2015).

Segundo Alencar (2015) o aumento da temperatura, apesar de ter várias consequências positivas associadas, como o aumento da metalização da carga e uma melhor resistência mecânica do ferro que é gerado, também pode levar à aderência das pelotas. Os aglomerados de pelotas, chamados em inglês de *clusters* Figura 5, impedem a passagem da carga ferrosa e o movimento ascendente do gás redutor.

Figura 5. Clusters em reatores de fornos.



Fonte: Alencar (2015).

Alencar (2015) citou estudos que exigiam a interrupção do processo de redução a ser realizado em temperaturas de aproximadamente 950°C e 1000°C devido à alta pressão interna do forno, está era alimentada pelos *clusters*. Isso ocorreu porque os cachos ficaram mais resistentes a essa temperatura, a ductilidade e a maleabilidade do material aumentaram e a densidade do ferro fibroso tornou as pelotas mais densas.

De acordo com Drozda (2012) a bauxita possui propriedades como alto ponto de fusão, elevada dureza além de excelente estabilidade química e térmica. Portanto, a importância da bauxita na produção de refratários se dá pela alta concentração de alumina que garante alta refratariedade do material, tornando-o ideal para uso em altas temperaturas.

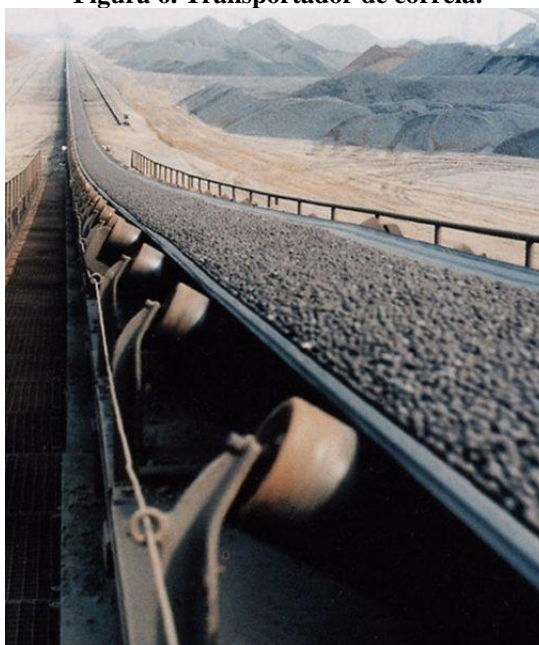
Para evitar ou reduzir a aderência dos pelotas, pode-se diminuir a quantidade de ferro, diminuir a temperatura de fusão, adicionar coque e carvão vegetal ou imergir em revestimentos feitos de materiais inertes para o processo de redução, como como óxido de magnésio, óxido de cálcio e óxido de alumínio. Esta opção final tem sido amplamente investigada, pois há muitos recursos dedicados a esta finalidade e um menor impacto no processo geral de redução de material (VIOTTI, 2020).

Além disso, a adição de bauxita às *pellets* também pode ajudar a melhorar a uniformidade e a homogeneidade das pelotas, o que é importante para garantir que a matéria-prima usada na produção de aço seja consistente e de alta qualidade. Além disso, é importante garantir que a bauxita usada seja de alta qualidade e esteja livre de impurezas que possam prejudicar a qualidade do aço produzido (ALENCAR, 2015).

2.3 TRANSPORTADOR DE CORREIA (TC)

Transportadores de correia (TC) são sistemas mecânicos utilizados para transportar materiais a granel e/ou embalados em uma linha de produção. Eles consistem basicamente em uma correia transportadora que se move sobre roletes ou tambores acionados por um motor, que puxa ou empurra o material ao longo da correia, pode ser visualizado na Figura 6 a seguir uma correia transportando minério. Segundo Munir (2018) a escolha do transportador de correia adequado pode ser crucial para o desempenho e eficiência da linha de produção. Além disso, o autor destaca que os transportadores de correia são equipamentos que apresentam baixo custo de manutenção e alta durabilidade se dimensionados corretamente.

Figura 6. Transportador de correia.



Fonte: Adaptado site da VIGA (2023).

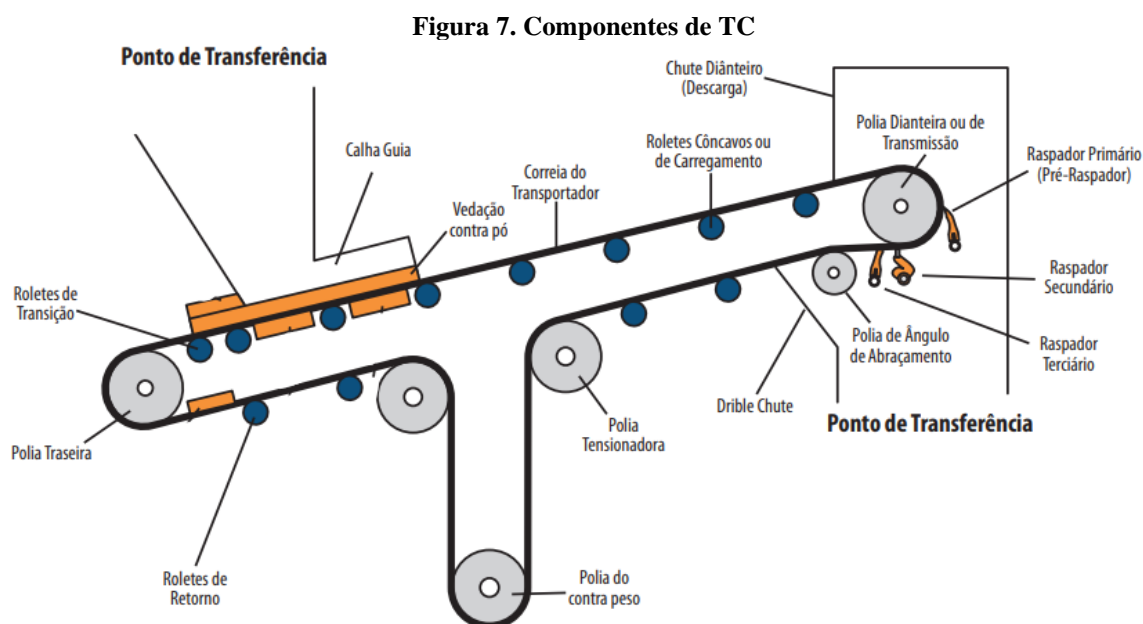
De acordo com Zanin *et al.* (2020) a manutenção regular dos transportadores de correia é fundamental para garantir a operação segura e eficiente do equipamento. Os autores destacam a importância da verificação periódica das correias, dos roletes e dos tambores, bem como o monitoramento de desalinhamentos, vibrações e temperaturas excessivas.

2.3.1 Principais componentes

Os principais componentes do TC são vários, porém, os principais incluem a correia transportadora, os roletes, os tambores e o esticado. A correia é responsável por formar a superfície no qual o material é depositado para percorrer o percurso, o movimento da correia faz com que o material granular seja transportado, o rolete e o conjunto de um ou mais rolos

em uma única sessão com função de guiar e conformar a correia no trajeto da correia transportadora, o tambor e o elemento cilíndrico que traciona a correia para que ela se movimente ou receba a correia em outra ponta, os esticadores são responsável por manter tensão sobre a correia garantindo a tração nos tambores com a correia, e a moega e responsável por receber e distribuir uniformemente o material sobre a correia (SWINDERMAN et al. (2012)).

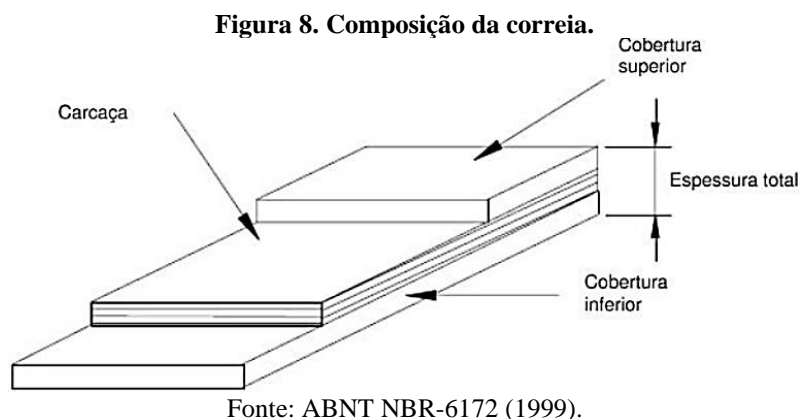
A Figura 7 ilustra os componentes de um TC.



Fonte: Adaptado de Swinderman *et al.* (2012).

2.3.1.1 Correia

As correias transportadoras são um componente vital dos transportadores de minérios, e sua escolha e uso adequado podem influenciar diretamente no desempenho e na eficiência do transporte. De acordo com Swinderman *et al.* (2012) as correias transportadoras de minério são projetadas para resistir a condições severas, como cargas pesadas, impactos, abrasão, rasgamento e corrosão. Isso exige que as correias sejam feitas com materiais resistentes e duráveis, que ofereçam alta resistência à tração e à flexão. A correia transportadora é composta basicamente por: cobertura superior, inferior e a sua estrutura como mostrado na Figura 8.



O principal componente de uma correia é sua carcaça e cabe à cobertura superior e inferior proteger a carcaça de danos como abrasão, altas temperaturas, impacto, que podem acontecer devido ao transporte de materiais, sendo a borracha vulcanizada a matéria prima da cobertura superior e inferior (ABNT NBR-6172, 1999). Segundo Swinderman *et al.* (2012) a carcaça interna da correia pode ser de dois tipos de material, aço ou lonas, dependendo dos requisitos de tensão do transportador, ela é responsável pela sustentação, além disso, deve ser reforçada o suficiente para suportar altas tensões causadas pela saída e movimento dos produtos, apresentar estabilidade para manter seu posicionamento durante todo percurso e para absorção do impacto causado pelo material que será transportado, sem que haja rompimento.

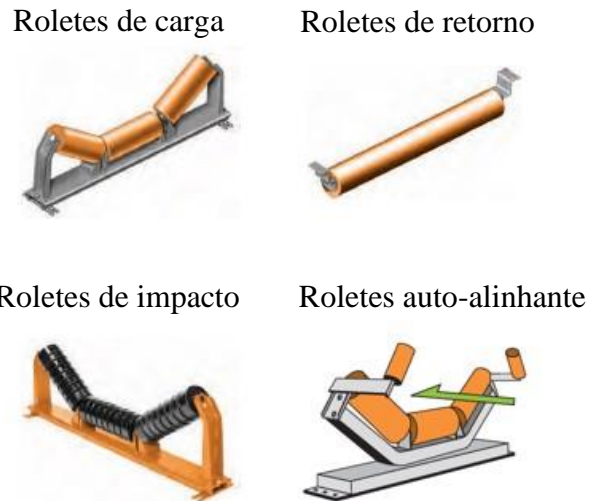
2.3.1.2 Roletes

Os roletes são componentes essenciais dos transportadores de minérios e têm como função principal suportar a correia transportadora e guiar seu movimento. Eles são responsáveis por minimizar o atrito e a resistência ao movimento, permitindo que a correia se desloque de forma mais suave e eficiente (DINIZ e BASTOS, 2017). A seleção adequada dos roletes e sua disposição no transportador podem influenciar significativamente o desempenho e a vida útil da correia transportadora.

Segundo Diniz e Bastos (2017) os roletes são componentes críticos e sua seleção adequada é fundamental para o desempenho e a vida útil da correia transportadora. Existem diversos tipos de roletes utilizados em transportadores de minérios, dentre eles, podem ser destacados os roletes de carga, os roletes de retorno, roletes de impacto e os auto-alinhante, como pode ser visualizado na Figura 9 os tipos de roletes para TC. Os roletes de carga têm a função de suportar o peso do material transportado pela correia, enquanto que os roletes de retorno têm a função de suportar o trecho de retorno da correia. Já os roletes de impacto são utilizados em pontos onde há maior impacto e desgaste, como nas áreas de transferência e o

auto-alinhante e distribuído ao longo do TC para evitar o desalinhamento e inserido também nos trechos de carregamento, quanto no de retorno.

Figura 9. Tipos de roletes.

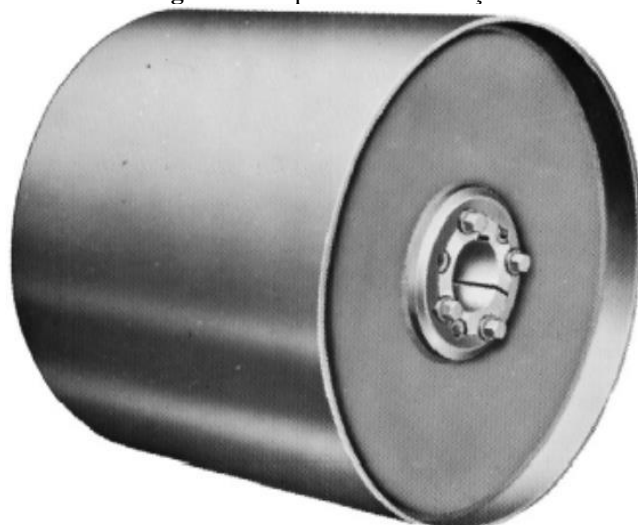


Fonte: Adaptado de Swinderman *et al.* (2012).

2.3.1.3 Tambor

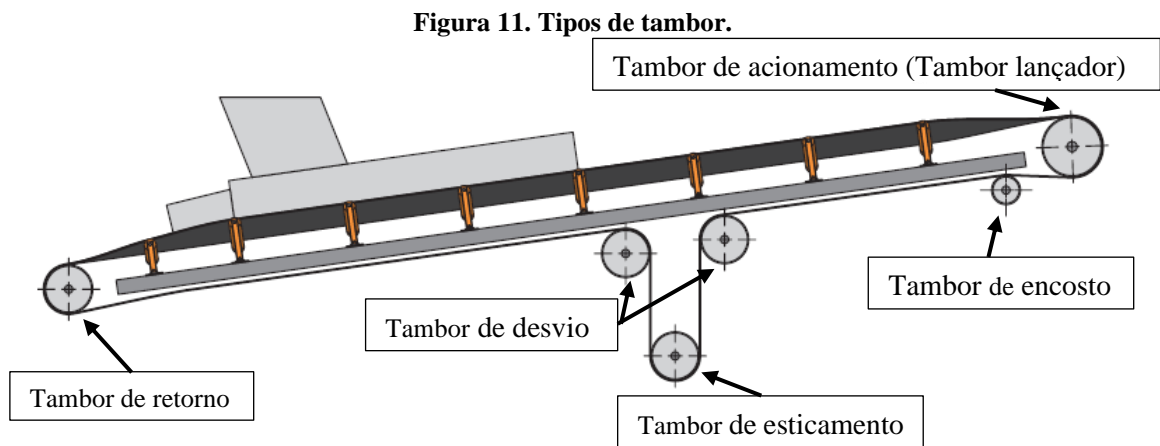
Os tambores são componentes fundamentais nos transportadores de correia, sendo responsáveis por transmitir a força motriz necessária para movimentar a correia. Segundo Diniz e Bastos (2017) eles são elementos cilíndricos compostos por eixo, bucha e revestimento, que proporcionam o movimento à correia transportadora, como apresentado na Figura 10.

Figura 10. Típico tambor de aço.



Fonte: CEMA (2009).

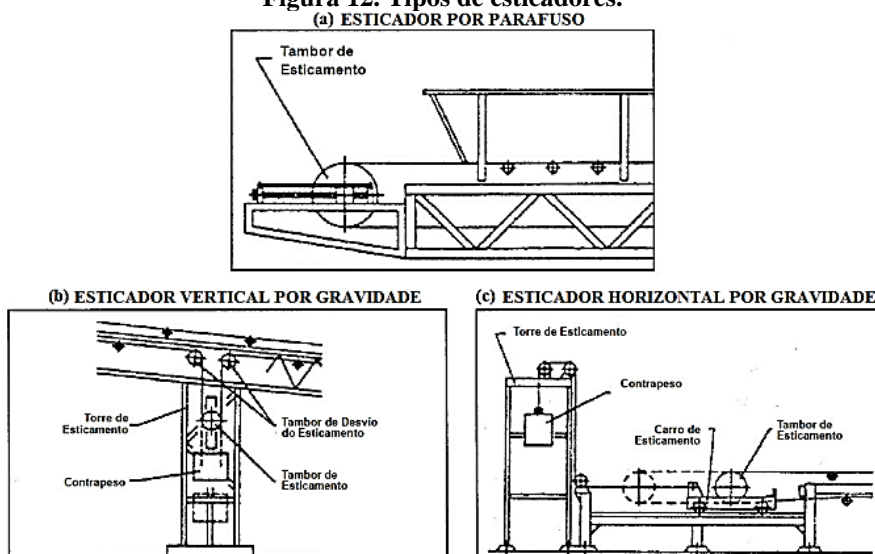
Existem diferentes tipos de tambores que podem ser utilizados em transportadores de correia de minérios, incluindo o tambor de acionamento que geralmente é o mesmo do tambor de descarga, o tambor de retorno, tambor de esticamento, tambor de desvio e o tambor de encosto, a Figura 11 mostra os tipos de tambor e suas posições. O tambor de acionamento (tambor de descarga) é responsável por transmitir a força motriz para movimentar a correia e lançar o material, que geralmente possui um motor ligado ao seu eixo para fazer a rotação do mesmo, enquanto o tambor de retorno é utilizado para sustentar a correia no seu retorno. Já o tambor de esticamento é responsável pela tensão da correia, tambor de desvio é utilizado em casos em que a correia precisa mudar de direção e o tambor de encosto é responsável por aumentar a área de contato da correia com o tambor de acionamento (DINIZ E BASTOS, 2017).



Fonte: Adaptado de Swinderman *et al.* (2012).

2.3.1.4 Esticador

Segundo Diniz (2017) os esticadores são componentes essenciais nos transportadores de minérios, responsáveis por manter a tensão adequada nas correias ao longo do sistema. Existem diferentes tipos de esticadores, como por parafuso, vertical por gravidade e horizontal por gravidade, cada um com suas particularidades e aplicações específicas, os tipos de esticadores podem ser visualizados na Figura 12 a seguir.

Figura 12. Tipos de esticadores.

Fonte: Gavi (2012).

De acordo com Swinderman *et al.* (2012) o esticador por parafuso é uma opção comum em transportadores de correia de longa distância, podendo ser utilizado em sistemas tanto horizontais quanto inclinados. Esse tipo de esticador é composto por um parafuso que permite ajustar a tensão da correia de forma gradual e precisa.

Já o esticador vertical por gravidade, segundo Dantas (2015) é indicado para transportadores com inclinação elevada, sendo composto por um peso suspenso que garante a tensão adequada na correia. Esse tipo de esticador é simples e de fácil instalação, porém pode não ser efetivo em transportadores com correias muito largas ou pesadas.

Por fim, o esticador horizontal por gravidade é uma opção versátil que pode ser utilizado em diversos tipos de transportadores, conforme aponta Swinderman *et al.* (2012) esse tipo de esticador é composto por um conjunto de rolos que mantém a correia tensionada por meio da gravidade, dispensando o uso de mecanismos complexos.

2.3.2 Laboratório de estudos em transportadores de correia

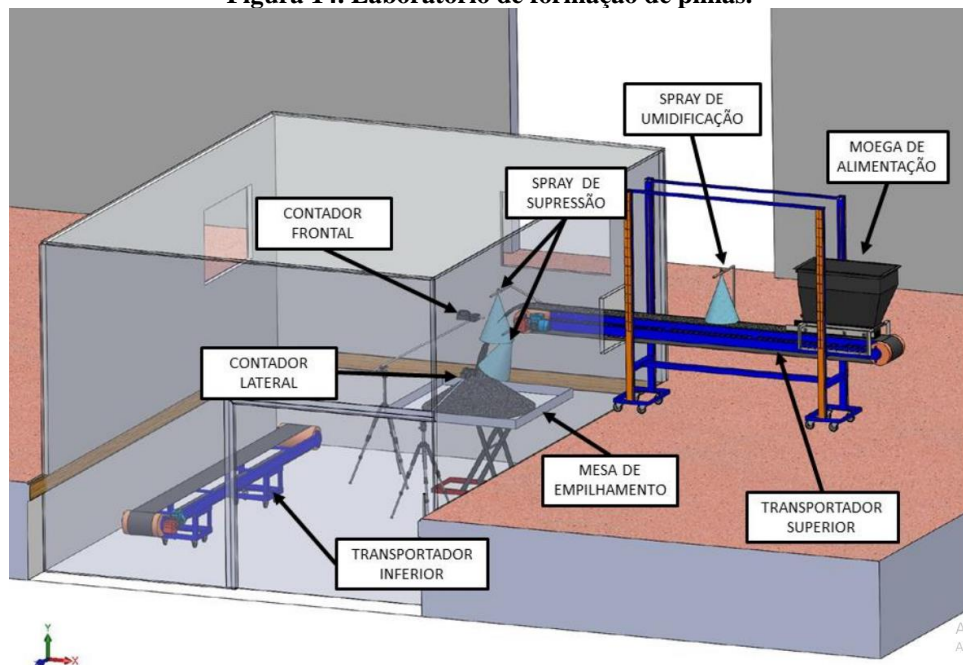
Para os estudos dimensional e similaridade do chute de pelotas utilizou-se uma bancada do Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados (FluidPar), onde a bancada existente do transportador de correia que foi utilizada em estudos anteriores para analisar os chutes de transferência de transportadores de correia. Esses estudos buscavam analisar o fluxo de materiais granulados para obter informações que pudessem ser aplicadas em projetos industriais, conforme mostrado na Figura 13. Os transportadores de correias também foram utilizados nos estudos de Castro (2022) sobre o experimento em escala de emissão de poeira no processo de empilhamento, como observado na Figura 14.

Figura 13. Bancada de transportadores de correia em chute de transferência.



Fonte: Adaptado de Piquet (2015).

Figura 14. Laboratório de formação de pilhas.

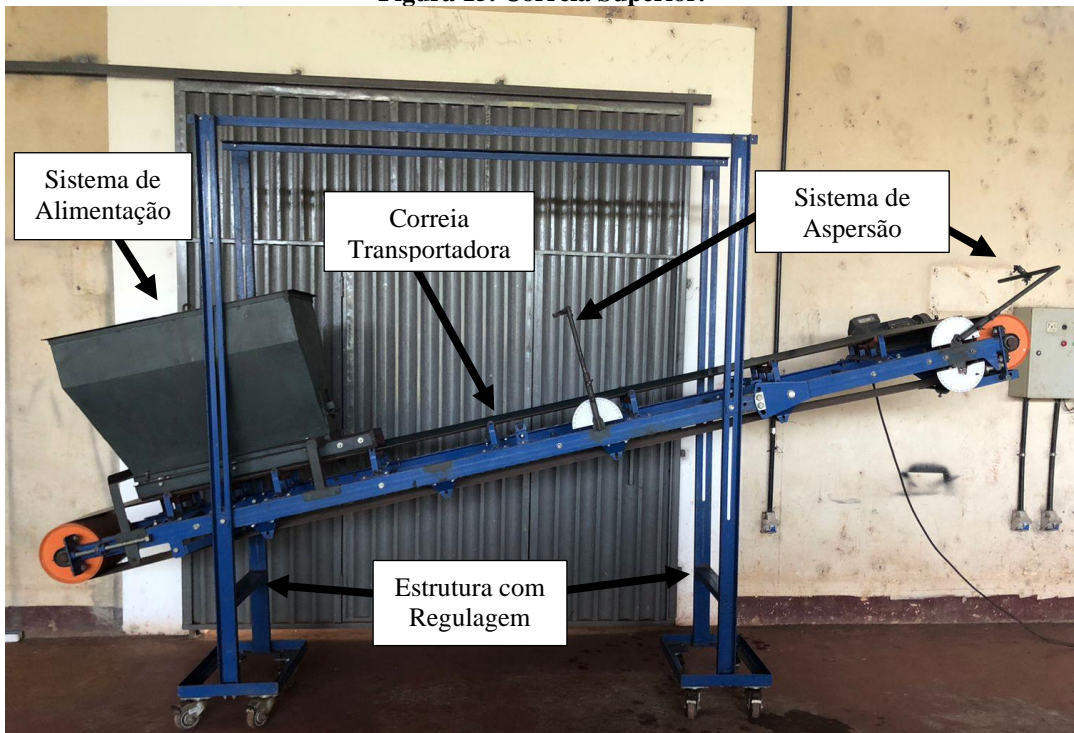


Fonte: Castro (2022).

O laboratório conta com dois transportadores de correia, um superior e outro inferior, os transportadores possuem 4000 mm cada de comprimento, distância medida do centro de um tambor ao outro. As correias dos TC são de dimensões iguais, sendo elas de PVC medido 279

mm de largura, medida essa que servirá para os estudos dimensional e similaridade do chute, logo tendo um comprimento de uma extremidade a outra de 4450 mm e a correia com largura de 1,3 mm. A correia superior apresentada na Figura 15 conta com roletes de 20° de inclinação, sistema de regulagem de altura e angulação de até 15°, sistema de aspersão, e um sistema de alimentação de fluxo contínuo com capacidade de 0,21 m³ com o transportador paralelo ao solo sem desnível, e com angulação máxima sua capacidade cai para 0,16 m³.

Figura 15. Correia Superior.



Fonte: Autoria própria (2023).

A Correia inferior apresentada na Figura 16 conta com roletes de 45° de inclinação, com motor de 1 CV e um motoredutor de 15:1, a correia superior conta com um motor de 4 CV com o mesmo motoredutor instalado. As correias contam com um painel com inversores de frequência, onde é possível variar as velocidade de cada uma das correias separadamente, em até 4 m/s a velocidade máxima.

Figura 16. Correia inferior.

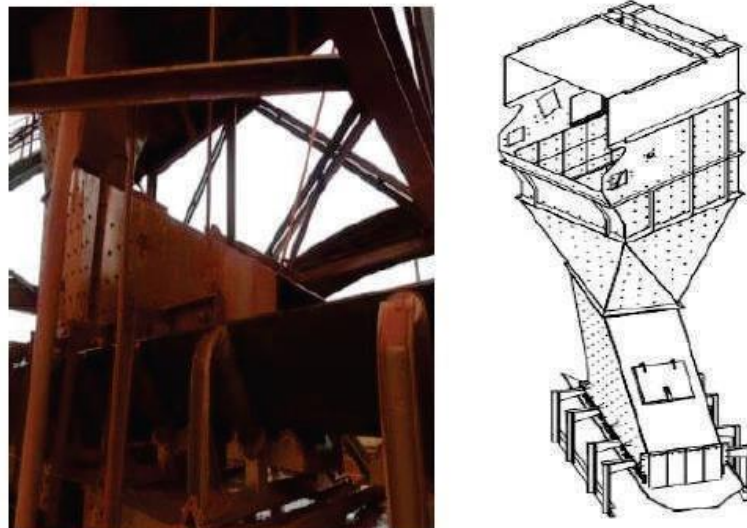


Fonte: Autoria própria (2023).

2.4 CHUTE DE TRANSFERÊNCIA

Um chute de transferência é um equipamento utilizado para movimentar materiais sólidos a granel de um local para outro em processos industriais, a Figura 17 mostra um chute que liga o fluxo de material entre dois transportadores de correia. De acordo com Roberts (2018) o funcionamento adequado dos chutes de transferência é essencial para garantir a eficiência do processo produtivo. Quando projetados corretamente, os chutes podem garantir uma transferência contínua e uniforme do material, minimizando perdas e desperdícios. Entretanto, quando mal projetados ou mal operados, os chutes podem ocasionar problemas como bloqueios do fluxo de material, desgaste excessivo de equipamentos e riscos à segurança dos trabalhadores. Os chutes de transferência podem ser utilizados em diversos tipos de processos industriais, como mineração, siderurgia, indústria química, entre outros.

Figura 17. Chute de transferência.



Fonte: Autoria própria (2023).

Conforme apontado por Arnold *et al.* (2018) o projeto dos chutes de transferência deve levar em conta uma série de fatores, como a densidade e o tamanho das partículas, a velocidade de escoamento, o ângulo de transferência e outros fatores que podem afetar a eficiência do processo. O autor destaca que, para um bom funcionamento do chute, é importante garantir a geometria adequada e a ausência de obstruções, além de considerar o uso de materiais de revestimento resistentes ao desgaste.

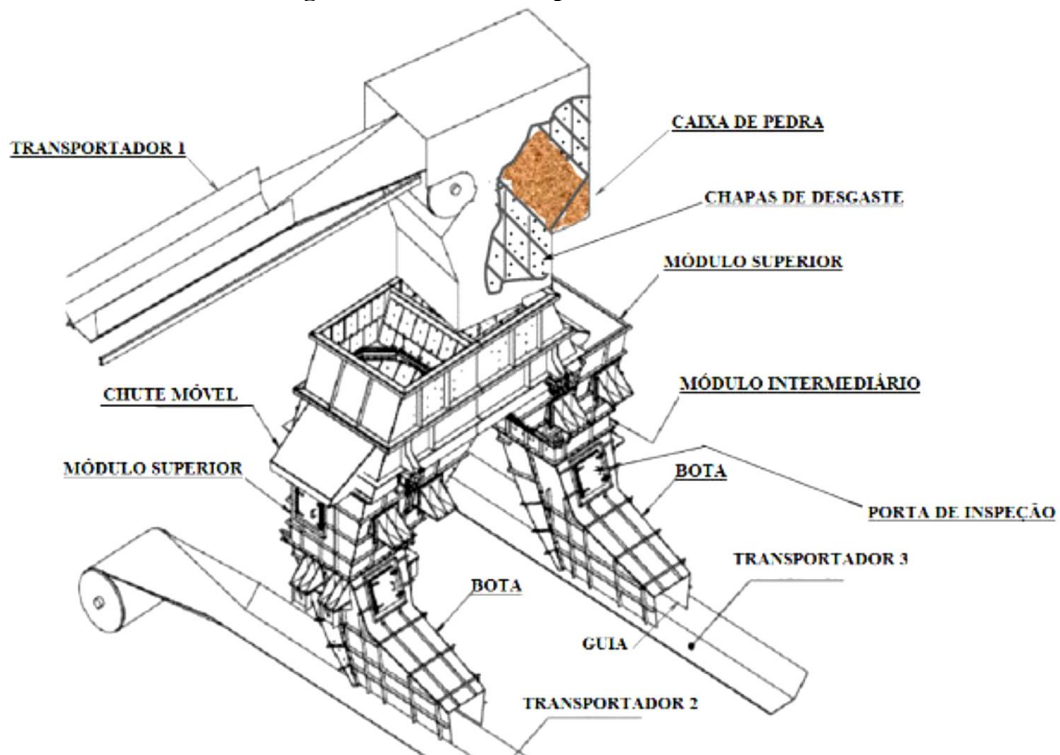
O monitoramento contínuo dos chutes de transferência pode ser uma estratégia eficaz para prevenir problemas e otimizar a operação do equipamento. O uso de sensores para monitorar a vazão de material e a presença de obstruções no chute, por exemplo, pode permitir

uma intervenção rápida e reduzir os riscos de paradas não programadas (TAVARES *et al.*, 2021).

2.4.1 Componentes de um chute

Um chute de transferência pode ser dividido em vários componentes, podem variar dependendo do seu projeto e aplicação específicos, como ilustrado na Figura 18, a zona de alimentação encontrasse na parte superior alimentado pelo transportador 1 de descarga (*discharge conveyor*). A zona de transferência que é responsável por distribuir o material onde tem a constituição de chapas de desgaste, caixa de pedra, porta de inspeção, bota e os módulos. E a zona de descarga que é onde está localizado os transportadores 2 e 3 que são os transportadores de recebimento (*receiving conveyor*), que possui as guias em contato com as correias para direcionar o fluxo de material.

Figura 18. Chute e suas partes constituintes.



Fonte: Rocha e Macias (2012).

2.4.1.1 Módulos

Os chutes de transferência de material granular podem ser construídos a partir de módulos, que são seções pré-fabricadas de diferentes tamanhos e formatos que são montados para formar o chute completo, onde dependendo do tamanho do chute, pode se ter a capota,

módulo superior, intermediário e módulo inferior. Essa abordagem modular tem sido cada vez mais utilizada na construção de chutes de transferência, pois oferece diversas vantagens, como facilidade de instalação e manutenção, rapidez na montagem e desmontagem, redução de custos e tempo de parada do processo.

Além disso, de acordo com Medhat *et al.* (2020) a abordagem modular pode ser utilizada para personalizar a geometria e a configuração dos chutes de transferência, adaptando-as às necessidades específicas de cada processo produtivo. Os autores destacam que a modularidade permite a construção de chutes de transferência sob medida, que podem maximizar a eficiência da transferência de material a granel e minimizar a formação de poeira e entupimentos.

2.4.1.2 Caixa de pedra

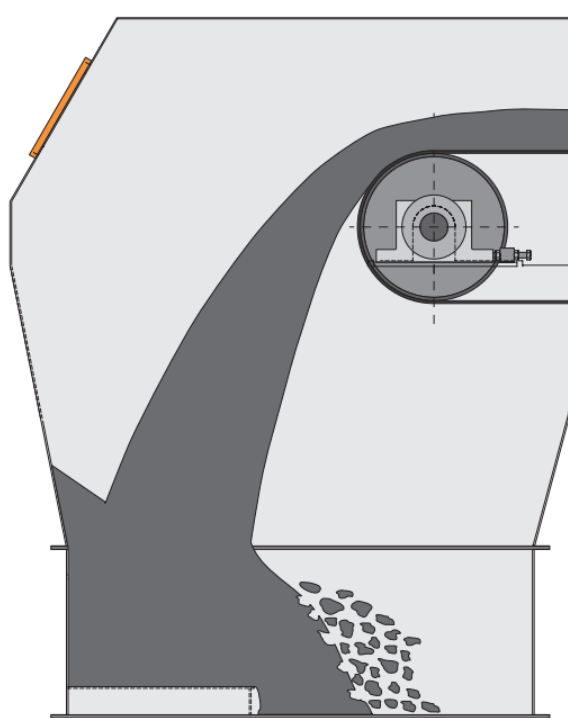
A caixa de pedra é uma parte importante dos chutes de transferência de material granular, como pode ser visualizada na Figura 19 a forma como é construída. Segundo Swinderman *et al.* (2012) que tem como objetivo desacelerar o material que está sendo transferido, absorver impacto e reduzir a velocidade do fluxo, de forma a minimizar o desgaste e a formação de obstruções no equipamento. Na caixa de pedra é formado um acúmulo de material, que faz um volume morto, onde forma uma inclinação. O material lançado atinge esse volume morto, não atingindo a parede do chute, com pode ser visualizado na Figura 20 o esquema de queda do material e o acúmulo na caixa de pedra.

Figura 19. Caixa de pedra de um chute.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 20. Fluxo de material na caixa de pedra.



Fonte: Swinderman *et al.* (2012).

Segundo Jeng *et al.* (2018) a caixa de pedra pode ser projetada e dimensionada utilizando modelos computacionais de simulação de fluxo de material a granel, que permitem prever com precisão o comportamento do material no chute e identificar possíveis pontos de obstrução ou desgaste excessivo. Os autores destacam que a simulação computacional pode ajudar a otimizar o design da caixa de pedra e garantir uma transferência mais suave e eficiente do material a granel.

2.4.1.3 Chapas de desgaste

As chapas de desgaste são placas que são instaladas no interior do chute para protegê-lo contra o desgaste causado pelo material a granel que está sendo transferido como pode ser visualizada na Figura 21. Segundo Swinderman *et al.* (2012) elas são geralmente feitas de materiais resistentes, como aço de alta dureza ou cerâmica, são substituídas periodicamente para manter a eficiência do equipamento e integridade do chute.

Figura 21. Chapas de desgaste.

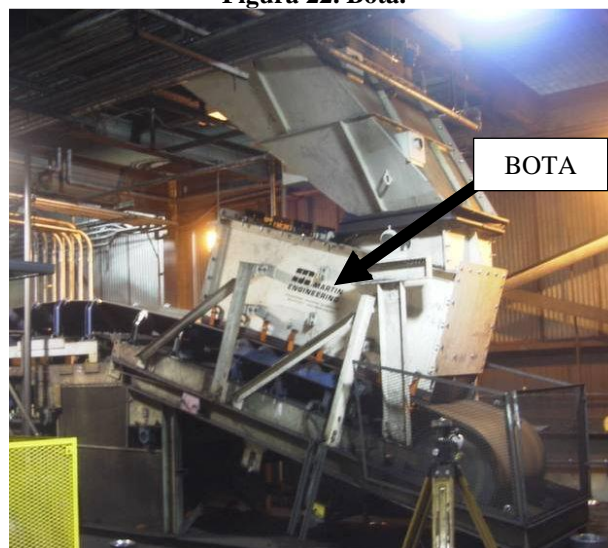


Fonte: Aatoria própria (2023).

2.4.1.4 Bota

A bota é um componente importante em chutes de transferência de material granular, pois é responsável pela distribuição do material de maneira uniforme na correia transportadora. Segundo Castro *et al.* (2020) a bota tem como função principal evitar o impacto do material com a correia transportadora, além de promover uma distribuição uniforme do fluxo do material na correia. Segundo Santos (2021) a bota também pode ser utilizada para controlar a altura do material na correia transportadora, o que pode afetar a eficiência do processo de transporte, na Figura 22 pode ser vista uma bota, que a parte final inferior do chute.

Figura 22. Bota.



Fonte: Adaptado de Swinderman *et al.* (2012).

2.4.1.5 Porta de inspeção

A porta de inspeção é uma abertura que pode ser instalada em diferentes pontos do chute, permitindo o acesso interno para inspeções, limpeza e manutenção do equipamento. Ela é projetada para ser facilmente removida ou aberta para permitir o acesso seguro dos operadores, e apresentada na Figura 23 a porta de inspeção de um chute localizada no módulo superior.

Figura 23. Porta de inspeção localizada no módulo superior.



Fonte: Autoria própria (2023).

2.4.1.6 Guias

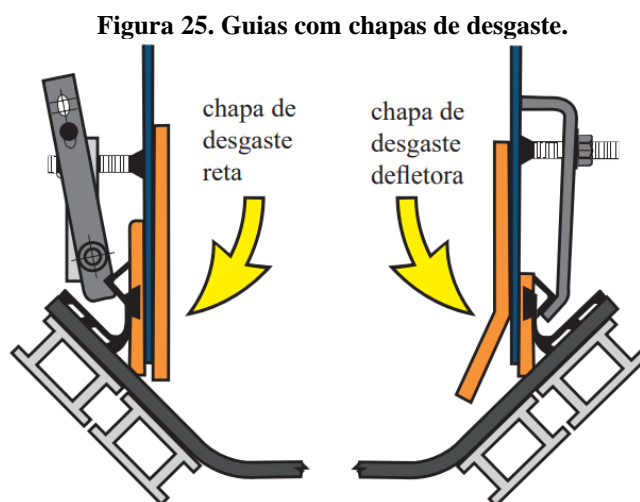
As guias são estruturas que são projetadas para direcionar o fluxo do material a granel ao longo do chute, ajudando a manter o fluxo uniforme e a minimizar a formação de obstruções. Elas podem ser construídas em aço ou polímeros resistentes ao desgaste e podem ter formatos e tamanhos variados, dependendo das características do material que está sendo transferido, Como é apresentado na Figura 24 as guias laterais.

Figura 24. Guias laterais.



Fonte: Adaptado de Swinderman *et al.* (2012).

Swinderman *et al.* (2012) destaca a importância das guias como um componente fundamental no projeto de chutes de transferência de material granular. Sua contribuição ressalta a necessidade de considerar cuidadosamente a geometria e o tipo das guias para garantir a eficiência do processo, reduzir o desgaste dos componentes do chute e aumentar a segurança operacional, como pode ser visto na Figura 25 as guias com proteção de chapas de desgaste.



Fonte: Adaptado de Swinderman *et al.* (2012).

2.5 SIMILARIDADE PARA CHUTE EM ESCALA

Na engenharia, a análise dimensional é imprescindível em muitos casos quando as equações que descrevem o problema são conhecidas. Contudo, em diversas situações, as equações não são conhecidas ou são demasiado complexas, dada a grande quantidade de variáveis envolvidas. Assim, o uso de experimentação torna-se fundamental, pois permite a elaboração de modelos em escala reduzida de um protótipo real, viabilizando a obtenção de informações confiáveis.

De acordo com Çengel (2012) na maioria dos experimentos, a análise dimensional é mais eficaz quando utilizada em modelos em escala geométrica, em detrimento do protótipo em escala real. Com isso, os resultados experimentais podem ser melhor aproveitados, racionalizando a pesquisa e possibilitando a redução de custos e otimização do tempo. O autor alerta também para a importância de se tomar cuidado ao dimensionar adequadamente a escala dos resultados, para que a análise dimensional seja realizada corretamente.

Assim, muitos engenheiros utilizam a análise dimensional como ferramenta técnica para resolver problemas em projetos e experimentos em escala. Para começar a análise, é necessário ter conhecimento das três premissas principais dessa técnica (CHEN e SANTOS, 2017):

- Gerar parâmetros adimensionais que auxiliam no projeto dos experimentos, tanto físicos ou numéricos, e na apresentação do relatório dos resultados;
- Obter as leis de escala para que o desempenho do projeto real possa ser previsto com o desempenho do projeto do modelo;
- Prever (às vezes) as tendências das relações entre os parâmetros.

2.5.1 Condições de similaridade

As condições de similaridade são critérios que determinam se dois objetos são similares, ou seja, se eles têm as mesmas formas ou proporções, independentemente do tamanho. Segundo White (2015) essas condições são importantes em muitas áreas, como engenharia, física e matemática, onde é necessário comparar objetos de diferentes tamanhos e determinar se eles podem ser considerados equivalentes.

As condições de similaridade são baseadas nas proporções das dimensões dos objetos. Em geral, dois objetos são considerados similares se eles têm as mesmas formas e as mesmas proporções de suas dimensões. Isso significa que as razões entre as dimensões dos objetos são constantes e iguais.

O conceito de similaridade é, em termo geral, uma indicação de que dois fenômenos têm um mesmo comportamento e por isso é a principal especificação a ser obedecida na implementação de um modelo físico. Condição de similaridade é o conceito implícito de análise dimensional, sendo, importante ser explicado para a compreensão da técnica da análise dimensional. Portanto, a similaridade consiste em obedecer a um escalonamento entre as grandezas e relações correspondentes ao desenvolver e implementar uma representação física em correspondência associada ao sistema real que se quer estudar (ÇENGEL, 2012).

Há três condições necessárias para semelhança completa entre um modelo e um protótipo. A primeira condição é a semelhança geométrica, o modelo deve ter a mesma forma que o protótipo, mas pode ser dimensionado por um fator de escala constante. A segunda condição é a semelhança cinemática, o que significa que a velocidade em qualquer ponto no fluxo do modelo deve ser proporcional (por um fator de escala constante) para a velocidade no ponto correspondente do fluxo de protótipo. Semelhança geométrica é um pré-requisito para similaridade cinemática (ÇENGEL, 2012).

A terceira, e mais restritiva condição de semelhança, é a de similaridade dinâmica, que é alcançada quando todas as forças no modelo de escoamento escalam por um fator constante para corresponder às forças no fluxo do protótipo. Tal como acontece com semelhança

geométrica e cinemática, o fator de escala para as forças pode ser menor que, igual a, ou maior do que um. Similaridade cinemática é uma condição necessária, mas insuficiente para semelhança dinâmica (ÇENGEL, 2012).

Assim, é possível para um fluxo real e um modelo de fluxo do protótipo obtenham simultaneamente similaridade cinemática e geométrica, ainda não semelhança dinâmica. Devem então existir as três condições de similaridade para semelhança completa ser assegurada.

A similaridade é uma relação matemática útil que permite comparar objetos de diferentes tamanhos e determinar se eles podem ser considerados equivalentes. Além disso, a similaridade é amplamente utilizada em modelagem, simulação e análise dimensional para estimar comportamentos e propriedades físicas de objetos de diferentes tamanhos (WHITE, 2015).

2.5.2 Teorema de Buckingham-Pi

O teorema de Pi, também conhecido como teorema de Buckingham-Pi, é uma ferramenta matemática amplamente empregada em engenharia, física e outras áreas para explicar a dependência dimensional de grandezas físicas. Esse teorema estipula que, caso uma grandeza física dependa de N grandezas básicas (como comprimento, massa e tempo, entre outras), então pode ser descrita por uma função de dimensões que depende exclusivamente dessas N grandezas.

De acordo com Freitas *et al.* (2015) a similaridade por meio do teorema de Buckingham-Pi envolve a comparação do comportamento de dois sistemas físicos que sejam semelhantes, ou seja, que apresentem a mesma forma, porém diferem apenas em escala. Por exemplo, dois edifícios de alturas distintas podem ser considerados semelhantes caso tenham a mesma forma, proporções e materiais. O teorema de Buckingham-Pi permite que se verifique a similaridade ao calcular o número de parâmetros dimensionais necessários para descrever cada sistema. Se o número de parâmetros dimensionais for idêntico para ambos os sistemas, eles são considerados semelhantes.

A utilização da similaridade baseada no teorema de Buckingham-Pi permite que os resultados de testes realizados em um sistema de escala menor sejam extrapolados para o sistema de escala real, o que pode ser uma alternativa mais econômica e prática em relação aos testes diretos no sistema real.

Seja Π (π) a denotação para um parâmetro adimensional. Em um problema de análise dimensional geral, há um π que se chama de dependente π , dando-lhe a notação π_1 . O parâmetro π_1 é em geral uma função de vários outros π 's, que se denota de independente π 's. A relação funcional é $0 = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_k)$ onde k é o total de π 's.

Para se determinar os π da equação e verificar se os modelos estão em escala o método mais utilizado é do teorema π de Vaschy-Buckingham. Ele estabelece que, se em uma equação física envolvendo certo número n de variáveis físicas dimensionais, sendo que estas variáveis são representadas por j dimensões físicas fundamentais independentes, a equação do processo ou sistema físico pode ser reescrita como uma equação de $p = n - j$ variáveis adimensionais (parâmetros π), construídas a partir das variáveis originais. Isso provê um método para calcular conjuntos de parâmetros adimensionais a partir das variáveis dimensionais dadas, mesmo se a forma da equação do sistema ou processo físico ainda é desconhecida. Encontrar parâmetros adimensionais em um problema pode simplificá-lo e até mesmo resolvê-lo. O método pode ser descrito em seis passos:

- Listar os parâmetros (variáveis dimensionais, variáveis adimensionais, e constantes dimensionais) e contá-los. Seja n o número total de parâmetros no problema, incluindo a variável dependente. Certifique-se de que qualquer parâmetro independente listado é de fato independente dos outros, ou seja, ele não pode ser expresso em termos deles.
- Listar as dimensões primárias para cada um dos parâmetros n .
- Selecionar o objeto com a medida de redução j . Como primeira hipótese, definido j igual ao número de dimensões principais representadas no problema. O número esperado de π 's igual a n menos j , de acordo com o teorema de Buckingham-Pi.
- Escolha j parâmetros de repetição que serão utilizados para a construção de cada π . Uma vez que os parâmetros de repetição têm o potencial de aparecer em cada π , certifique-se de escolhê-los cuidadosamente.
- Gerar um π de cada vez pelo agrupamento do j repetindo parâmetros com um dos parâmetros restantes, obrigando o produto a ser adimensional. Por convenção, o primeiro π , designado como um, é o π dependente. Manipular π 's como necessário para atingir os grupos adimensionais estabelecidos.
- Verifique se todos os π 's são de fato sem dimensão. Escrever a relação funcional na forma de equação. Dessa forma, definem-se os π para as propriedades independentes utilizadas, e encontram-se os valores do modelo em escala utilizando o fator de escala. Observando a forma que cada parâmetro é alterado com a escala.

2.5.3 Similaridade para TC e chute

Utilizando a aplicação do teorema Buckingham-Pi com a finalidade de analisar o escoamento das partículas não coesivas do chute de transferência das pelotas. Sabe-se que as forças do escoamento dependem das seguintes grandezas e que possuem as dimensões primárias (M=massa, L=comprimento e T=tempo). Como sabemos, as pelotas no escoamento dependem diretamente desse modo temos:

- Taxa de fluxo de massa (\dot{m});
- Densidade (ρ);
- Aceleração da gravidade (g);
- Diâmetro da partícula (D);
- Comprimento característico (l);
- Velocidade da correia (v);
- Ângulo de repouso (α);
- Fator de forma da partícula (S_f);

Assim, tem-se a eq. (1):

$$F = f(\rho, g, D, l, v, S_f, \dot{m}, \alpha), n = 8 \quad (1)$$

Observando-se as dimensões das variáveis, define-se o sistema de grandezas fundamentais. Assim, $j = 3$, que é o número de dimensões principais que descrevem o sistema. Reescreve-se a eq. (1) para encontrarmos a relação funcional entre as variáveis do sistema temos a eq. (2):

$$0 = f(\rho, g, D, l, v, S_f, \dot{m}, \alpha) \quad (2)$$

Escolhe-se a massa específica aparente (ρ_a), comprimento característico (l) e a velocidade da correia (v) como grupo de parâmetros de repetição. Essa escolha deve-se a cada um desses parâmetros terem o potencial de descrever as dimensões principais do sistema. Como o fator de forma (S_f) e o ângulo de repouso (α) já são grandezas adimensionais, esses já são um número π por si mesmos. Chama-se π_1, π_2, S_f e α , respectivamente. Logo, se definem três grupos π para análise.

Pela aplicação da teoria de Buckingham-Pi, faz-se a análise dimensional do conjunto de variáveis anteriores, chegando aos grupos adimensionais a seguir as eq. (3), (4), (5) e (6):

$$\pi_1 = S_f \quad (3)$$

$$\pi_2 = \alpha \quad (4)$$

$$\pi_3 = \frac{D}{l} \quad (5)$$

$$\pi_4 = \frac{lg}{v^2} = \left(\frac{lg}{v^2}\right)^{\left(-\frac{1}{2}\right)} = \frac{v}{\sqrt{lg}}, \text{Número de Froude} \quad (6)$$

O número de Froude, expressa a relação entre as forças inerciais e gravitacionais. Observa-se que contém apenas dimensões de comprimento e tempo, e sendo assim a eq. (7) representa um parâmetro cinemático pois representa uma relação entre essas dimensões (comprimento e tempo).

$$\pi_5 = \frac{\dot{m}}{\rho_a v l^2} \quad (7)$$

Sabe-se a relação da vazão volumétrica que é dada pela eq. (8):

$$\pi_5 = \frac{\dot{m}}{\rho_a} \quad (8)$$

Assim, com a eq. (7), pode-se introduzir a seguinte constante adimensional, chamada Número de capacidade que está definida pela eq. (9):

$$C = \frac{Q}{v l^2} \quad (9)$$

O Número da capacidade expressa o fato que a capacidade volumétrica da correia varia com a velocidade e a área da seção transversal. Nota-se que nenhum dos grupos π contém um termo de massa específica. Logo, o fluxo é independente da massa específica. Isso tem sentido físico, pois a adimensionalização das variáveis do sistema reflete a descrição qualitativa do sistema ser a mesma para qualquer material. Ou seja, espera-se por exemplo que, o fluxo possa ser mais rápido ou lento dependendo do material, mas seu comportamento qualitativo será o mesmo. Essa é uma das grandes vantagens da adimensionalização do sistema, o potencial de generalizar os resultados.

Para escoamento de material à similaridade recai no emprego do número de Froude, e considerando que para o empilhamento de um material granular a uma altura de queda (l), tem-se que ser descrita pela eq. (10):

$$v = \sqrt{2gl} \quad (10)$$

Substituindo esta eq. (10) na eq. (6), tem-se a eq. (11):

$$\frac{l_P}{l_M} = \lambda \quad (11)$$

Os índices P e M são relacionados ao protótipo e modelo, respectivamente. Em específico, protótipo (P) diz respeito ao cenário real, como as estruturas encontradas nas indústrias. Por sua vez, modelo (M) refere-se ao sistema que será estudado em escala menor,

em laboratório. Então, a eq. (11) descreve a relação de escala e proporcionalidade entre o aparato real da indústria e o laboratório.

Assim, em escoamento granulares, temos que o diâmetro da partícula e a largura da correia são escaladas geometricamente, na mesma razão que a escala dimensional. Com as análises acima, pode-se usar as duas equações adimensionais, o Número de Froude eq. (6) e o Número Capacidade eq. (9), fazendo a devida igualdade do protótipo para o modelo em escala. Assim, pode-se encontrar informações para similaridade do escoamento real com relação ao modelo em escala. Por exemplo, apenas com manipulação matemática pode-se determinar a velocidade do modelo (v_M), que é a velocidade do aparato experimental no laboratório. Supondo que tanto no modelo quanto no protótipo o material está em queda livre, usa-se a eq. (10) para encontrar a nova eq. (12):

$$v_M = v_P \frac{\sqrt{l_M}}{\sqrt{l_P}} = v_P \sqrt{\frac{1}{\lambda}} \quad (12)$$

Fazendo o mesmo com a eq. (9) do Número Capacidade e substituindo na equação anterior, determina-se a vazão volumétrica do modelo (Q_M) eq. (13).

$$Q_M = Q_P \left(\frac{l_M}{l_P}\right)^{\frac{5}{2}} = \frac{Q_P}{\lambda^{\frac{5}{2}}} \quad (13)$$

De conhecimento desses fatores adimensionais, pode-se fazer a verificação com a comparação dos fatores da correia em tamanho real (protótipo) com a correia em escala (modelo).

2.6 PROPRIEDADES DE MATERIAIS GRANULARES

2.6.1 Densidade real do material granular (ρ_b)

A densidade real, também chamada de densidade absoluta, é uma propriedade intrínseca das partículas granulares e é definida como a massa de um material por unidade de volume, excluindo quaisquer vazios entre as partículas. A densidade real de um material granular depende do tamanho, forma e densidade das partículas individuais, bem como da sua estrutura cristalina e da sua porosidade (ULUSOY, 2023).

A densidade real é uma medida importante para materiais granulares que apresentam espaços vazios entre as partículas, como grãos, areia e pós. A densidade real é definida como a relação entre a massa do material e o volume total das partículas sólidas, excluindo os espaços vazios. A densidade real é uma medida fundamental das propriedades dos materiais granulares

e é importante em muitas aplicações práticas, como na determinação do volume de grãos em silos e na previsão de fluxo de materiais granulares em sistemas de transporte (ULUSOY, 2023).

A determinação da densidade real de materiais granulares é realizada por meio de métodos específicos, como a técnica do picnômetro, do balão volumétrico ou do método da geometria (ULUSOY, 2023). A escolha do método a ser utilizado deve levar em consideração as características do material granular e o grau de precisão requerido na medida.

Em resumo, a densidade real é uma medida importante para materiais granulares, que apresentam espaços vazios entre as partículas. A densidade real pode ser afetada por muitos fatores, incluindo o tamanho e forma das partículas, a umidade, a compressão e a forma como as partículas estão empacotadas. Segundo Ulusoy (2023) a determinação da densidade real é realizada por meio de métodos específicos e deve levar em consideração as características do material granular e o grau de precisão requerido na medida.

2.6.2 Densidade aparente do material granular (ρ_s)

A densidade aparente pode variar amplamente dependendo da forma como as partículas granulares estão arrançadas na amostra. Por exemplo, a densidade aparente de uma amostra granular pode ser menor se as partículas estiverem soltas e com muitos espaços vazios entre elas, enquanto a densidade aparente pode ser maior se as partículas estiverem compactadas e ocupando menos espaço (CORNACCHIA *et al.*, 2020).

A densidade aparente é uma medida importante para materiais granulares, como grãos, areia, pós e materiais minerais, que apresentam espaços vazios entre as partículas. É definida como a relação entre a massa do material granular e o volume total ocupado pelo material, incluindo os espaços vazios. Segundo Li *et al.* (2021), a densidade aparente é uma medida importante em muitas aplicações práticas, como na indústria de mineração, alimentícia, na agricultura e na indústria de construção civil e nos transportes de granular, onde é usada para determinar a quantidade de material necessária para preencher um determinado volume.

Podendo variar amplamente para diferentes materiais granulares e pode ser afetada por muitos fatores, como o tamanho e forma das partículas, a umidade, a compressão e a forma como as partículas estão empacotadas. A densidade aparente também pode ser afetada pelo modo como o material granular é manipulado e transportado. Por exemplo, a densidade aparente de areia pode ser reduzida durante o transporte pneumático, devido à ação de fluidização induzida pela alta velocidade do ar (CORNACCHIA *et al.*, 2020).

A determinação da densidade aparente de materiais granulares é realizada por meio de métodos específicos, como o método do frasco de areia ou do volume de furos. A escolha do método a ser utilizado deve levar em consideração as características do material granular e o grau de precisão requerido na medida, pode ser afetada por muitos fatores, incluindo o tamanho e forma das partículas, a umidade, a compressão e a forma como as partículas estão empacotadas (ULUSOY, 2023).

2.6.3 Ângulo de Repouso do material granular (ϕ)

O ângulo de repouso é uma propriedade importante de materiais granulares, definido como o ângulo máximo que um monte de material granular pode atingir sem se desfazer ou fluir. O ângulo de repouso é influenciado por diversas propriedades dos materiais, incluindo a forma, o tamanho e a distribuição de tamanho das partículas, bem como a umidade e a densidade do material (CHAKRABORTY *et al.*, 2021).

Segundo Chakraborty *et al.* (2021), Arboleda e Restrepo (2020) o cálculo do ângulo de repouso é importante na indústria de materiais granulares, uma vez que afeta diretamente a eficiência de processos como o transporte e o armazenamento de materiais granulares. Um ângulo de repouso alto indica que o material é mais estável e pode ser empilhado em montes mais altos sem se desfazer, o que pode reduzir o espaço de armazenamento necessário e o custo de transporte.

Diversos estudos têm investigado os fatores que afetam o ângulo de repouso e a sua influência em outras propriedades dos materiais granulares. Por exemplo, um estudo de Arboleda e Restrepo (2020) investigou o efeito da forma das partículas no ângulo de repouso e na segregação dos materiais granulares. O estudo mostrou que partículas esféricas possuem um ângulo de repouso menor e são menos propensas a se segregar do que partículas irregulares.

Além disso, o ângulo de repouso pode ser usado para prever outras propriedades dos materiais granulares, como a porosidade, a permeabilidade e a resistência mecânica. O ângulo de repouso também pode ser usado para classificar os materiais granulares com base em suas propriedades, como a fluidez e a coesão (CHAKRABORTY *et al.*, 2021).

2.6.4 Granulometria

A granulometria é uma propriedade fundamental dos materiais granulares, e sua importância é reconhecida por diversos autores em diferentes áreas de estudo. A granulometria é definida como a distribuição das partículas em diferentes tamanhos e é avaliada por meio da

curva granulométrica, que mostra a distribuição percentual das partículas em diferentes faixas de tamanho. Segundo Chakraborty *et al.* (2021), a granulometria é uma das principais características que determinam a qualidade dos materiais granulares, que pode afetar a trabalhabilidade, a densidade aparente, a resistência mecânica e a estabilidade dos materiais granulares. Além disso, a granulometria pode ter um impacto significativo na aderência entre as partículas de agregados, afetando as propriedades mecânicas.

A granulometria dos materiais granulares pode ser avaliada por meio de ensaios específicos, como a análise granulométrica por peneiramento. A norma técnica brasileira

NM 248 (ABNT, 2003) estabelece o método de ensaio para a análise granulométrica de agregados.

2.6.5 Umidade (w)

A umidade é outra propriedade importante dos materiais granulares e pode ter um grande impacto nas suas propriedades físicas e mecânicas. A umidade do material é definida como a quantidade de água presente no material em relação ao seu peso seco. O teor de umidade pode variar de acordo com a natureza do material, a forma como ele foi armazenado e as condições ambientais. A determinação da umidade dos materiais granulares é realizada por meio de ensaios específicos, como o ensaio de estufa, que consiste em secar o material em uma estufa a uma temperatura constante até que todo o teor de umidade seja removido, permitindo a determinação da massa seca do material e, portanto, o cálculo do teor de umidade. A norma técnica brasileira NBR 6459 (ABNT, 1984) estabelece o método para a determinação do teor de umidade de solos.

A presença de umidade pode afetar a trabalhabilidade do material, a resistência mecânica, a densidade aparente e a estabilidade do material. Segundo Pinto *et al.* (2019), a umidade é uma das propriedades que mais influenciam o comportamento mecânico do solo, afetando a resistência e a compressibilidade do material. Pinto *et al.* (2019) afirmam que o teor de umidade também pode afetar a adesão entre partículas de agregados, influenciando as propriedades mecânicas do granular.

2.7 ENSAIOS NA CAIXA DE FLUXO REDUZIDA

Foram usados os ensaios de caracterização do material granular (pelotas) realizado por Mesquita (2016), que realizou ensaios em duas caixas de fluxos semelhantes geometricamente, a real tendo seção de 500 mm de largura por 1000 mm de comprimento e 1000 mm de altura,

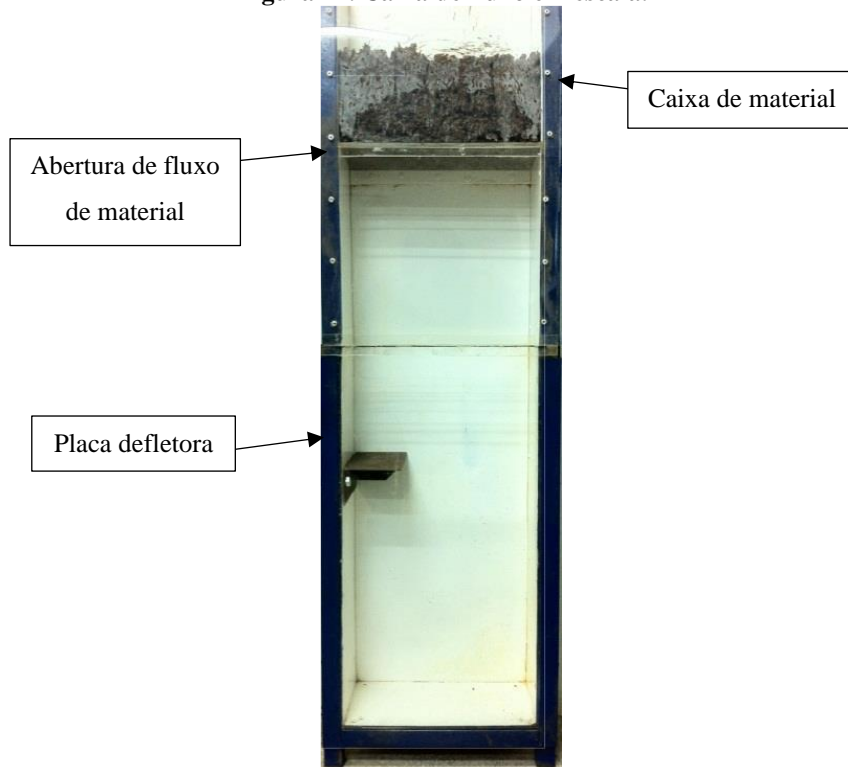
como apresentada na Figura 26, e a caixa em escala de 1:4 tendo uma seção de 125 mm de largura por 250 mm de comprimento e altura de 1000 mm, conforme mostrado na Figura 27 a caixa de fluxo em escala, os ensaios foram realizados em duas placas defletoras sendo elas 20° e 90°, essas placas são apresentadas na Figura 28 onde a quatro defletoras variando suas inclinações de 20° a 90°

Figura 26. Caixa de fluxo de grande porte (*Big Box*).



Fonte: Mesquita (2016).

Figura 27. Caixa de fluxo em escala.



Fonte: Adaptado Mesquita (2016).

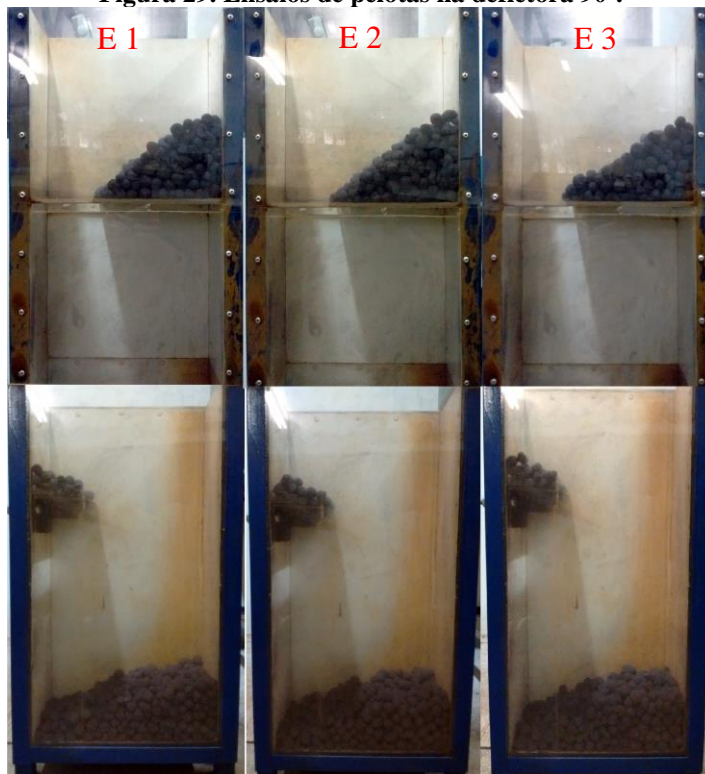
Figura 28. Placas defletoras.

Fonte: Mesquita (2016).

Para a comprovação dos resultados em escalas foram feitos ensaios em escala real e escala reduzida da caixa em três tipos diferentes de materiais, e Mesquita (2016) diz que as leis de semelhança quanto ao escoamento granular com coesão são semelhantes, se o material for testado nas mesmas condições de granulometria e umidade, a escala geométrica também pode ser transferida para o diâmetro da partícula, sem alterar a coesão no modelo numérico, ou seja, o parâmetros de calibração ainda são aplicáveis à simulação de fluxo escala industrial.

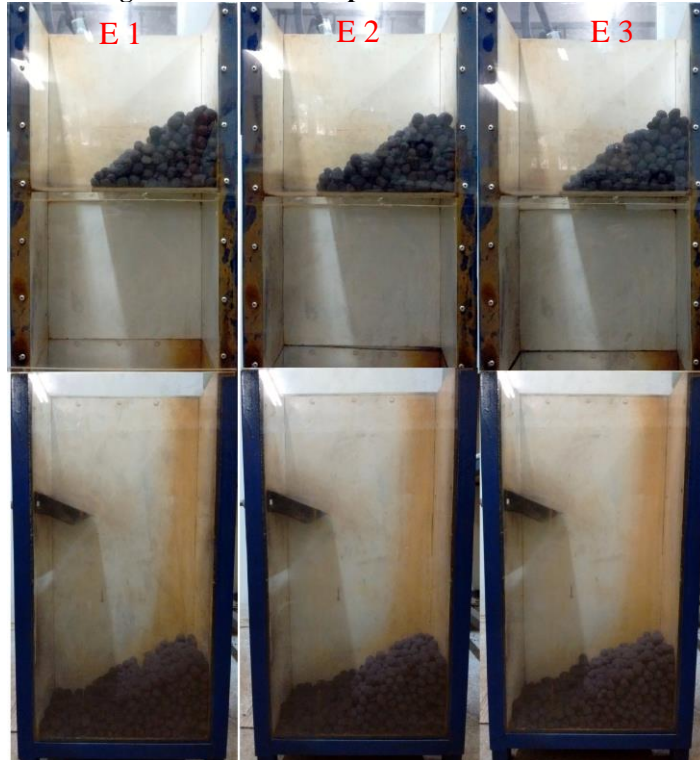
O material granular utilizado para ensaio foi a pelota de ferro queimadas, que possui massa específica aparente de $2,00 \text{ g/cm}^3$ e granulometria que varia de 5 mm a 15 mm, foram realizados três ensaios na placa defletora de 90° , o acomodamento do material nos ensaios pode ser visto na Figura 29, e foram feitos três ensaios com a defletora de 20° como apresentado na Figura 30 com altura de material inicial na caixa de 105 mm.

Figura 29. Ensaio de pelotas na defletora 90°.



Fonte: Mesquita (2016).

Figura 30. Ensaio de pelotas na defletora 20°.



Fonte: Mesquita (2016).

2.8 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DEM

Para a análise do chute e o fluxo de material foi empregado o Método dos Elementos Discretos (*Discrete Element Method - DEM*), este método engloba métodos que permitem a análise de deslocamentos e rotações de corpos discretos, incluindo fenômenos como escoamento, fluxo, compactidade, segurança, entre outros que está sendo utilizado principalmente no escoamento de materiais granulares em escala industrial (CLEARY, 2010). Ele também é amplamente utilizado em aplicações industriais, como na simulação de processos de moagem, transporte de partículas, embalagem, fraturas, quanto métodos que reconhecem automaticamente novos contatos à medida que ocorrem tanto material como material e a estruturas ao seu redor (BIAN *et al.*, 2017; JOHANSSON *et al.*, 2017).

Segundo Cleary (2010) com o desenvolvimento da tecnologia atual de processamento e armazenamento de dados de computador, o DEM começou a ser mais usado em projetos de fluxo de partículas tridimensionais e tem uma forte aplicação na otimização de processos na indústria de processamento mineral. Cálculos e iterações são realizados podendo ser visualizados, o método DEM é conhecido por sua capacidade de lidar com a complexidade das interações entre partículas, incluindo forças de contato, atrito, impacto e entre outros, o que o torna uma ferramenta poderosa para a análise de sistemas granulares.

O Método dos Elementos Discretos é utilizado principalmente na simulação numérica de materiais granulares que fluem com ou sem continuação, podendo ser utilizados para visualizar fenômenos reais e experimentais.

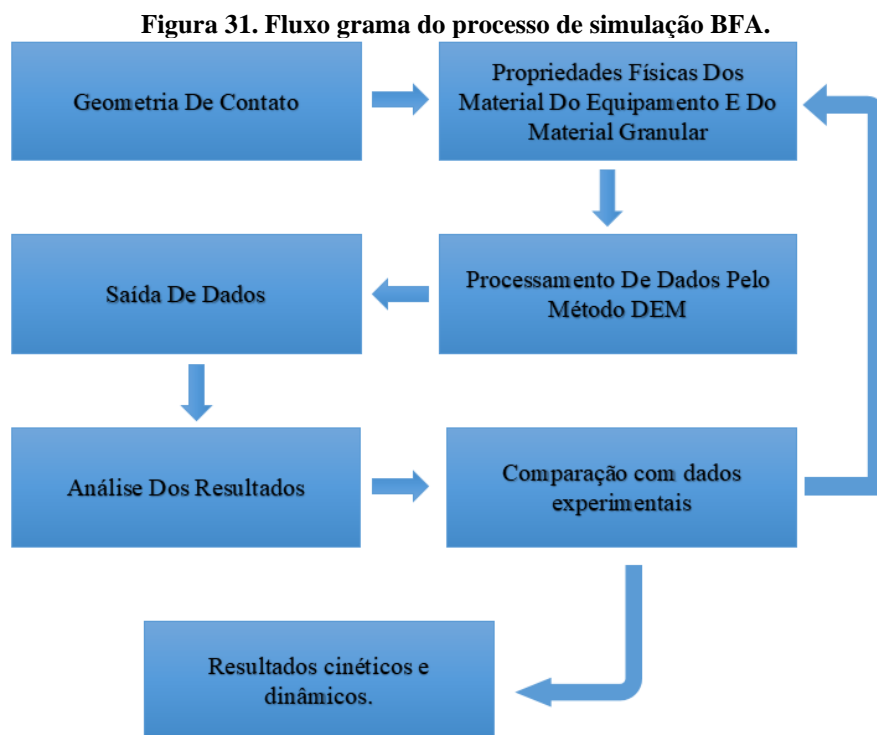
2.8.1 Bulk Flow Analyst™

2.8.1.1 Apresentação do software

O *Software Bulk Flow Analyst™* (BFA), desenvolvido pela empresa *Overland Conveyor Company*, é um software que permite a modelagem de escoamento de partículas através da técnica numérica do DEM. É utilizado para simular o movimento de partículas sólidas em um meio fluidificado, como o transporte de grãos em silos, pás carregadeiras, britadores, transportadores de correias, chutes de transferência, e entre outros. O BFA é especialmente útil para o estudo de problemas relacionados ao fluxo de partículas em instalações industriais, como o desenho de projetos de chutes e silos, o dimensionamento de equipamentos, a otimização de processos e a resolução de problemas de entupimento de desalinhamento de correias transportadoras. O software permite a realização de simulações em

tempo real, o que é útil para a visualização de situações de operação e para a identificação de pontos críticos.

O BFA ele como qualquer outro *software* de simulação e resumido em três entradas lógicas sendo elas a entrada de dados, o processamento e a saída de dados como apresentado na Figura 31. Os dados de entrada são a geometria e a propriedades do material granular, o processamento e pelo método DEM, os dados de saída final são comparados com os resultados dos dados experimentais, caso os dados de comparação sejam satisfatórios temos os resultados de calibração cinéticos, dinâmicos do material e da geometria de contato do material granular, caso contrário são feitas novas modificações nas propriedades do granular e feito o processo novamente.



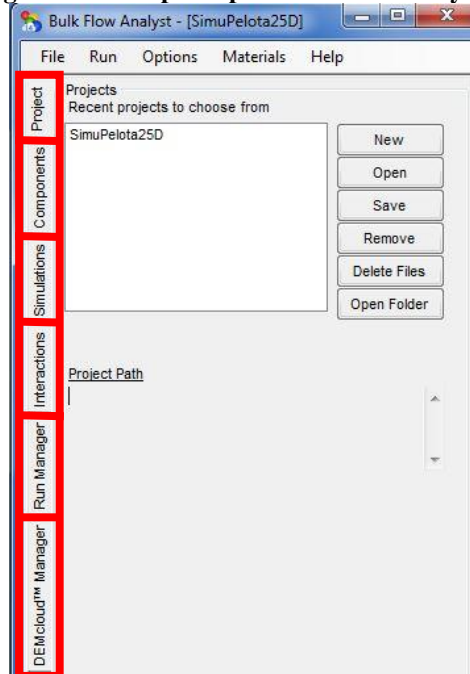
Fonte: Autoria própria (2023).

Para a calibração do material o *software* permite algumas modificações de parâmetros do modelo numérico eles são: coeficiente de atrito entre partículas (*Interparticle Friction*), coeficiente de coesão entre partículas (*Interparticle Cohesion*), coeficiente de adesão da partícula à parede (*Particle Surface Adhesion*) e coeficiente de atrito com a parede (*Wall Friction*). Para a calibração do modelo numérico, são realizados ensaios de visualização do escoamento do material granulado em caixa de fluxo.

A tela principal do BFA e apresentada na Figura 32, nela pode ser visualizada em destaque as árvores de projeto (**Project**), componentes (**Componentes**), simulações

(*Simulations*), interações (*Interactions*), gerente de execução (*Run Manager*) e o gerenciador de conta DEM (*DEMcloud™ Manager*).

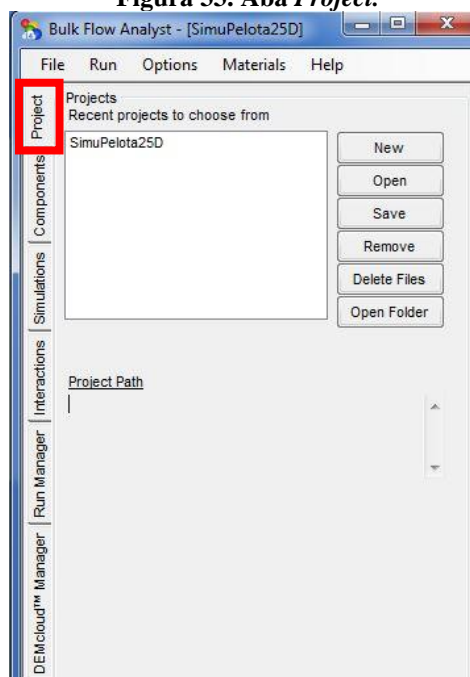
Figura 32. Tela principal Bulk Flow Analyst™.



Fonte: Adaptado de Overland Conveyor Company (2014).

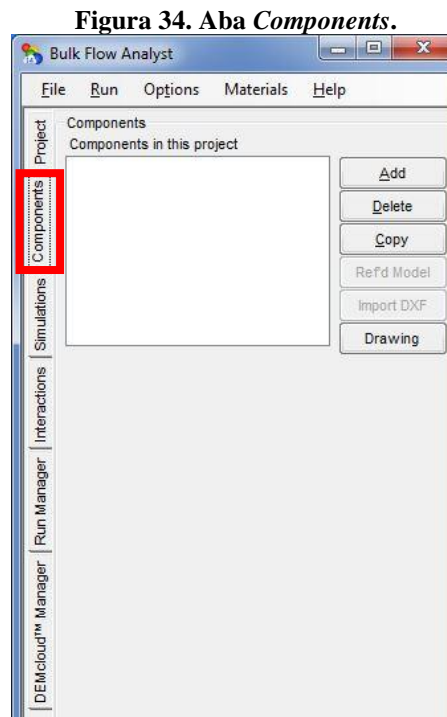
Na Tela inicial e principal do BFA na aba *Project*, em destaque na Figura 33, cria-se a pasta de destino do projeto que deve ser nomeada e criada. Clicando em *New* pode se criar a pasta e salvar para iniciar o novo projeto.

Figura 33. Aba Project.



Fonte: Adaptado de Overland Conveyor Company (2014).

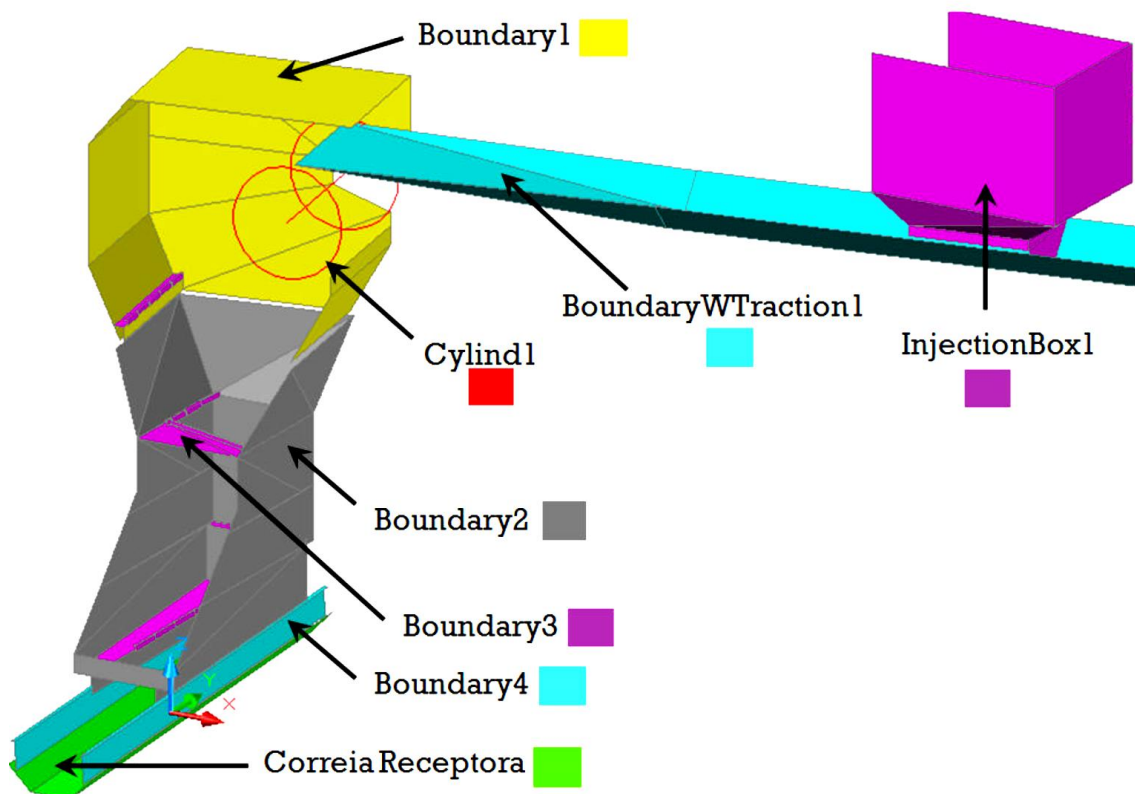
Na seção intitulada *Components*, apresentada na Figura 34, os elementos do projeto são incluídos, tais como o material e a geometria do chute. A geometria do chute é composta pelas superfícies internas do chute (*Boundary*), caixa de alimentação (*InjectionBox*), correia transportadora de descarga (*BoundaryWTraction*), cilindro motriz (*Cylind*) e a correia receptora, onde as seções que têm contato com o material devem ser seccionadas.



Fonte: Adaptado de Overland Conveyor Company (2014).

A Figura 35 ilustra como o BFA identifica a geometria de um chute como sendo um dos componentes do projeto. Em seguida, cada um desses componentes é apresentado na tela do BFA, juntamente com seus dados de entrada correspondentes.

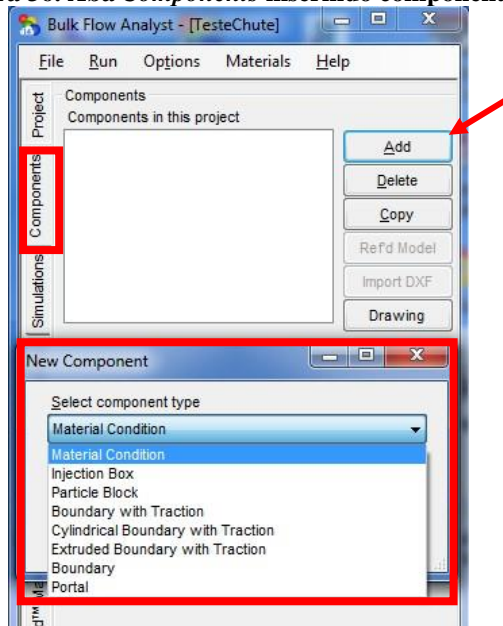
Figura 35. Reconhecimento dos componentes pelo BFA.



Fonte: Rocha e Macias (2012).

Ainda na janela de *Components* são inseridos (*Add*) dados dos componentes para simulação, como apresentados na Figura 36. Neste componente, os dados inseridos os dados do material (*Material Conduction*), incluem a massa específica aparente (*Bulk Density*) em kg/m^3 , o coeficiente de atrito interpartícula (*Interparticle Friction*), o coeficiente de coesão interpartícula (*Interparticle Cohesion*), o tamanho das partículas (*Particle Size Distribution*) em milímetros e o tamanho das partículas finas (*Radius of Fine*), também na mesma unidade de medida, nessa janela é incluído os outros componentes com foi apresentado na Figura 35.

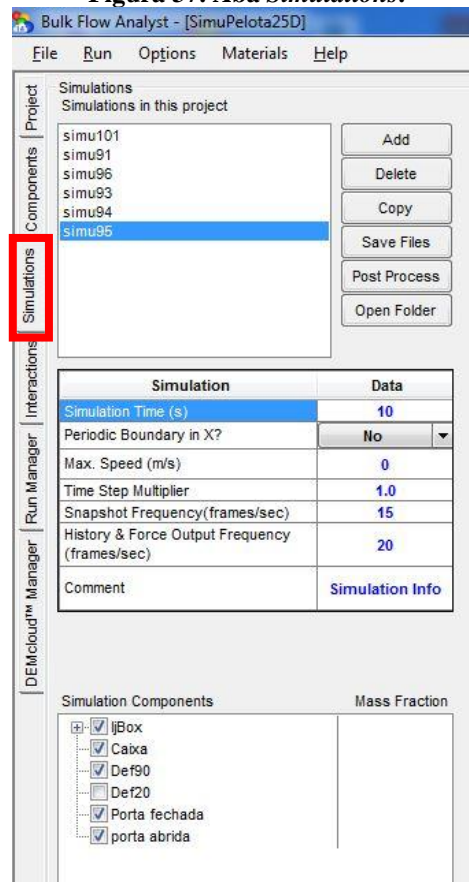
Figura 36. Aba *Components* inserindo componentes.



Fonte: Adaptado de Overland Conveyor Company (2014).

No menu *Simulations* (Simulações), apresentado na Figura 37, é possível criar uma várias simulações com mesmo projeto de componentes, onde cada nova simulação cria uma subpasta destinada à pasta de projetos criados inicialmente. A partir daí, é permitido escolher quais componentes do projeto devem fazer parte da simulação e o tempo em que a simulação irá durar, esse tempo no caso e o tempo real das interações dos componentes e não o tempo que irá durar o processamento da simulação.

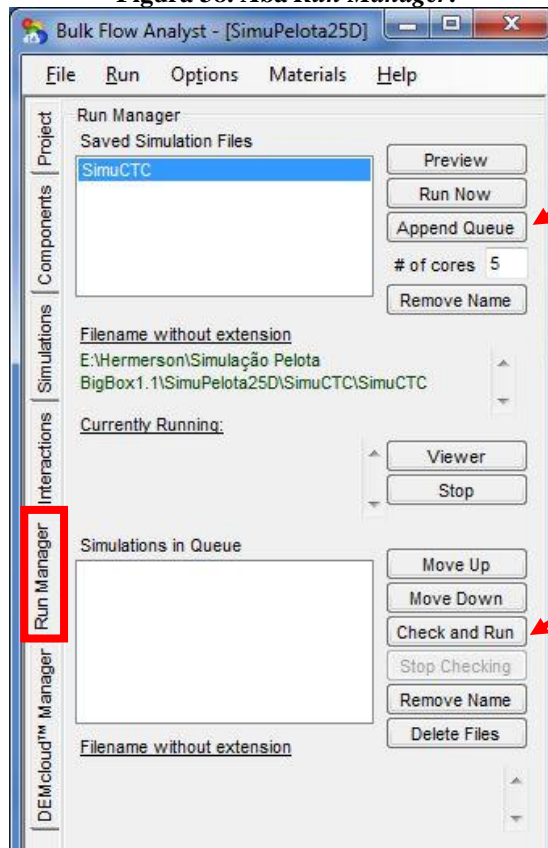
Figura 37. Aba Simulations.



Fonte: Adaptado de Overland Conveyor Company (2014).

Na aba *Run Manager* (Gerenciador de Execução), conforme apresentado na Figura 38, é possível iniciar a simulação depois que a pasta de simulação tiver sido criada, através da opção *Run Now* (Executar Agora) e logo em seguida em *Check and Run* (Verificar e Executar).

Figura 38. Aba Run Manager.



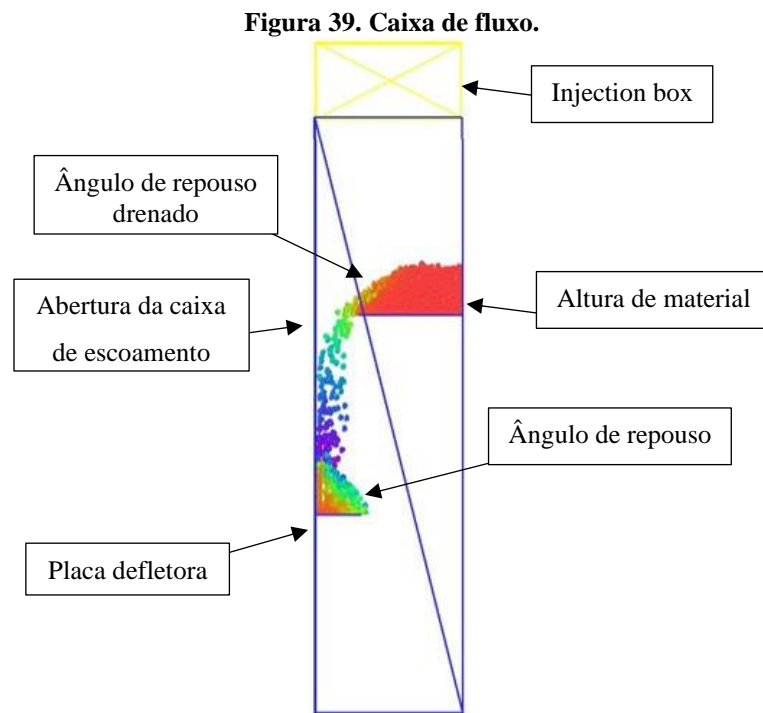
Fonte: Adaptado de Overland Conveyor Company (2014).

2.8.1.2 Calibração do modelo DEM

Para o modelo a estratégia utilizada envolve ajustar o modelo DEM por meio de um teste de laboratório em escala reduzida, mas com a simulação em uma escala ampliada. Dessa forma, é possível obter um tamanho de partícula que permita um tempo computacional apropriado para análises em escala industrial. Então foi realizado duas calibrações com tamanho de partículas distintas, para que possa haver a simulação de fluxo tanto no chute em escala real quanto no em escala.

No estudo atual, a etapa de calibração envolveu um processo iterativo que incluiu a comparação entre experimentos reais e simulações numéricas. Foram realizados vários ensaios numéricos de comparação dos ensaios reais numéricos, os parâmetros de calibração (coeficiente de atrito interpartícula, coeficiente de coesão interpartícula, coeficiente de adesão da partícula à parede e coeficiente de atrito com a parede) ajustes foram feitos até que se alcançasse a melhor semelhança possível entre os resultados dos testes reais e os testes numéricos, alguns dados disponibilizados pela VALE apresentam dados como densidade real da pelota queimada de 4,4 t/m³, densidade aparente de 2,0 t/m³ e granulometria que varia de 5 a 15 mm de diâmetro.

A Figura 39 apresenta a geometria da caixa de fluxo e os componentes, onde foi realizado duas calibrações de materiais (pelota), uma com raio de partícula de 7,5 mm sendo fiel a granulometria real das pelotas onde foi utilizado a caixa de fluxo reduzida já apresentada na Figura 27, e outra com pelotas de raio 25 mm com a caixa de fluxo em escala real como já apresentada anteriormente na Figura 26, escolha essa por conta do processamento da simulação.



Fonte: Autoria própria (2023).

Após a simulação feita, pode haver a comparação com os ângulos de repouso ensaiados, caso os ângulos não coincidirem e feito novo ensaio numérico modificando as propriedades do material citada. A calibração do material foi feita utilizando duas placas defletora com inclinação de 20° e 90°, as imagens utilizadas foram para calibração foram de Mesquita (2016).

Na Figura 40 e 41 temos os ângulos de acomodação do material nos ensaios na defletora de 90°, na extremidade esquerda temos o ensaio da pelota na caixa de fluxo reduzida, e na extremidade direita temos o ensaio numérico da caixa de fluxo real.

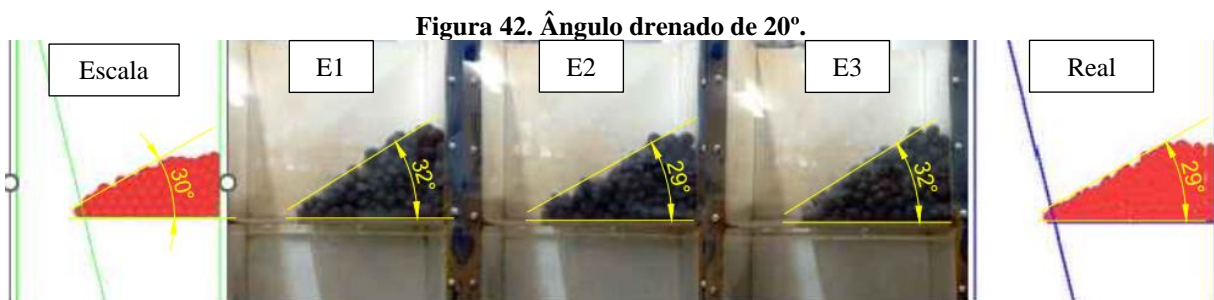


Fonte: Adaptado de Mesquita (2016).



Fonte: Adaptado de Mesquita (2016).

As Figuras 42 e 43 representam os ângulos de acomodação do material nos ensaios realizados na defletora de 20°. Na figura 42, o ensaio da extremidade esquerda foi conduzido com a caixa de fluxo reduzida, enquanto na figura 43, o ensaio numérico foi realizado na extremidade direita da caixa de fluxo real. Ambas as figuras ilustram os resultados dos ensaios de acomodação do material em diferentes configurações de escalas.



Fonte: Adaptado de Mesquita (2016).



Fonte: Adaptado de Mesquita (2016).

A Tabela 1 apresenta os dados de calibração da pelota encontrados nos ensaios em comparação com dados encontrados no ensaio numérico, pode se notar que os dados são bem próximos uns aos outros, bem como observado a maneira em que os ângulos de repouso são acomodados. Em inúmeros ensaios de simulação numérica esses foram o que se obteve melhores condições de similaridade com os ensaios reais, sendo um resultado bem satisfatório.

Tabela 1. Ângulos de calibração da Pelota
ÂNGULO DE CALIBRAÇÃO DAS PELOTAS

PELOTAS	Ângulo de Repouso					Ângulo de Repouso Drenado				
	E1	E2	E3	Simu. Escala	Simu. Real	E1	E2	E3	Simu. Escala	Simu. Real
<i>Defletora 90°</i>	20°	23°	25°	23°	25°	34°	34°	29°	33°	29°
<i>Defletora 20°</i>	0°	0°	0°	0°	0°	32°	29°	32°	30°	29°

Fonte: Autoria própria.

De acordo com Mesquita (2016) o diâmetro das partículas influencia os parâmetros de calibração nos ensaios de acomodação do material em caixas de fluxo. Durante os ensaios, foram observadas diferenças significativas nos valores dos parâmetros de calibração para o protótipo e o modelo em escala, principalmente em relação ao atrito de rolamento e à coesão interpartículas, como observado na Tabela 2.

Os resultados em caixas de fluxo destacam a importância de se considerar as particularidades do material, uma vez que o diâmetro das partículas influencia os parâmetros de calibração e, conseqüentemente, afeta o comportamento do material durante o processo de acomodação. Além disso, a diferença nos valores de parâmetros de calibração para os dois tipos de escoamento, protótipo e modelo em escala, reforça a necessidade de investigar mais profundamente os efeitos desses fatores, como o atrito de rolamento e a coesão interpartículas, para um melhor entendimento do comportamento do material.

Tabela 2. Dados de calibração da Pelota
DADOS DE CALIBRAÇÃO DA PELOTA

<i>Material Condition</i>	Unidade	Real	Escala
		1:1	1:2.87
<i>Bulk Density</i>	kg/m ³	2000	2000
<i>Packing Ratio</i>	s/u	2.2	2.2
<i>Particle Density</i>	kg/m ³	4400	4400
<i>Interparticle Friction</i>	s/u	0.11	0.016
<i>Maximum Radius</i>	mm	25	7.5
<i>Minimum Radius</i>	mm	25	7.5
<i>Interparticle Cohesion Coefficient</i>	s/u	0	0

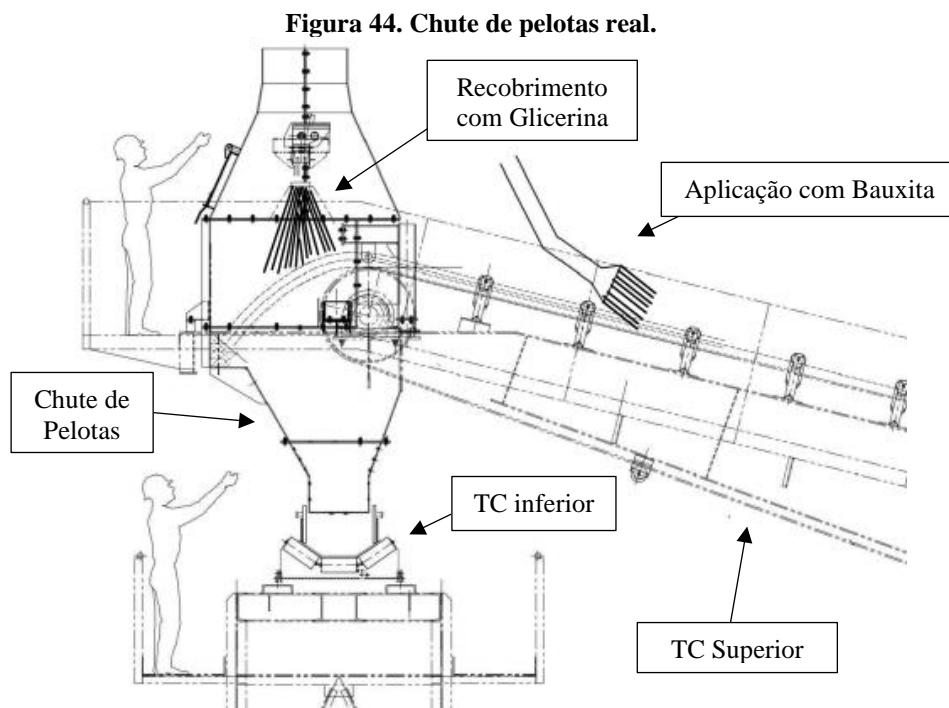
Fonte: Autoria própria.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CHUTE ABORDADO

O chute apresentado na Figura 44 é utilizado para direcionar o fluxo de pelotas entre dois transportadores de correia. O TC tem a função de guiar o material proveniente da usina de pelletização em direção ao chute. Durante o percurso da correia, é realizada a aplicação de bauxita, e no momento do lançamento do material para o chute, é aplicada a glicerina.

O material é então descarregado pelo chute e ligado ao TC inferior, que é uma correia transportadora responsável por empilhar o material no pátio de estocagem. É importante ressaltar que esse processo é fundamental para a operação da usina, pois garante a correta disposição e armazenamento das pelotas, visando a sua qualidade e a segurança dos operadores, pois como já apresentado o recobrimento das pelotas por glicerina ajuda no controle de poeira proveniente do empilhamento.



O objetivo principal do projeto em escala do chute de pelotas é analisar o recobrimento das pelotas. Em escala reduzida, é possível a realização de ensaios reais no chute de pelotas, permitindo que os pesquisadores avaliem o comportamento do material e identifiquem possíveis problemas de recobrimento final das pelotas.

Além disso, a simulação numérica é uma importante ferramenta que contribui significativamente para a visualização do fluxo de material, permitindo que sejam realizadas

análises mais precisas e detalhadas. Dessa forma, é possível avaliar diferentes cenários e condições de operação, bem como testar diferentes configurações do chute de pelotas, a fim de identificar as melhores soluções para o projeto final.

Nesse sentido, o projeto em escala do chute de pelotas desempenha um papel fundamental na melhoria do processo produtivo de pelotização. Através da análise do recobrimento das pelotas e da simulação numérica, é possível identificar oportunidades de otimização do processo, bem como de redução de custos e tempo de produção, pois se identificado problemas como entupimento, desalinhamento dos transportadores de correia ou queda de material que possa danificar o chute.

Portanto, é essencial que sejam realizados estudos e ensaios em escala reduzida para o desenvolvimento de projetos mais eficientes e seguros, que atendam às necessidades da indústria e garantam a qualidade do produto final. Através do projeto em escala do chute de pelotas, é possível obter importantes informações sobre o comportamento do material, que são fundamentais para a implementação de melhorias e inovações no processo de pelotização.

3.2 ANÁLISE DE SIMILARIDADE DO CHUTE

Para o estudo de análise dimensional e de similaridade foram usados os dados da Tabela 3, onde se tem a capacidade nominal, capacidade do projeto, velocidade da correia e a largura da correia que será a base para o fator de escala.

Tabela 3. Dados técnicos do projeto real

<i>DADOS TÉCNICOS DO PROJETO REAL</i>		
<i>Capacidade Nominal</i>	t/h	840
<i>Velocidade da Correia</i>	m/s	2,85
<i>Largura da Correia</i>	mm	800

Fonte: Adaptado de VALE.

Para iniciar o dimensionamento, é necessário determinar o fator de escala (λ), utilizando a eq. 11 e o comprimento da correia como comprimento característico. Com isso, pode-se obter o valor correto do fator de escala e prosseguir com o dimensionamento adequado, conforme mostrado na eq. 14, temos um resultado adimensional:

$$\lambda = \frac{l_p}{l_M} = \frac{800 \text{ mm}}{279 \text{ mm}} = 2,87 \quad (14)$$

Com essa informação foi determinado a velocidade do modelo (v_M), utilizando a eq. 12, e temos a velocidade do modelo apresentado na eq. 15:

$$v_M = v_P \sqrt{\frac{1}{\lambda}} = \left(2,85 \frac{m}{s}\right) \sqrt{\frac{1}{2,87}} = 1,68 \frac{m}{s} \quad (15)$$

Tendo em vista as informações obtidas, é possível determinar a vazão volumétrica do modelo em escala (Q_M), utilizando a eq. 13, a partir da velocidade do protótipo (v_p) e da velocidade do modelo (v_M) em escala. Para isso, é necessário, primeiramente, converter a vazão mássica do modelo em vazão volumétrica do modelo real. Esse cálculo é realizado dividindo-se a vazão mássica pela densidade aparente do material a ser transportado, conforme apresentado a seguir na eq. 16.

$$Q_{pn} = \frac{Q_{mm}}{\rho_s} \rightarrow Q_p = \frac{840 \frac{t}{h}}{2,00 \frac{t}{m^3}} = 420 \frac{m^3}{h} \quad (16)$$

Para determinar a vazão volumétrica do chute em escala (Q_M), utiliza-se a eq. 13, a partir da vazão do chute real (Q_P). A vazão volumétrica representa o volume de material que passa por uma determinada seção do sistema de transporte por unidade de tempo e é uma grandeza fundamental para o dimensionamento e o controle de sistemas de transporte de materiais, com isso temos a eq. 17, a seguir com resultados da vazão volumétrica.

$$Q_M = \frac{Q_P}{\lambda^2} = \frac{420 \frac{m^3}{h}}{2,86^2} = 30,17 \frac{m^3}{h} \quad (16)$$

Abaixo, na Tabela 4, é apresentado um resumo dos dados e resultados obtidos nos cálculos realizados anteriormente para o transporte real e em escala reduzida. A tabela permite comparar os valores de diferentes grandezas obtidos em cada situação e avaliar o desempenho do sistema de transporte em cada caso.

Ao comparar os dados obtidos para o transporte real e em escala reduzida, é possível avaliar a eficácia do modelo em simular o comportamento do sistema em escala real e identificar eventuais diferenças ou limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados.

Tabela 4. Tabela de parâmetros de escala

PARÂMETRO DE SIMILARIDADE			
<i>Parâmetro</i>	Unidade	Protótipo	Modelo
<i>Largura Correia Transportadora</i>	mm	800,00	279,00
<i>Fator de Escala</i>	s/u	1,00	2,87
<i>Velocidade do Transportador</i>	m/s	2,85	1,68

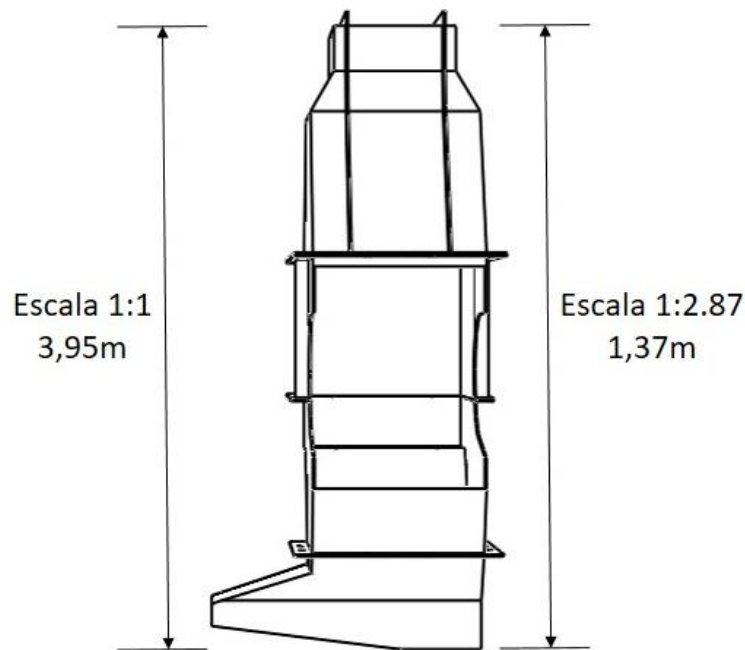
<i>Vazão Mássica</i>	t/h	840,00	60,33
<i>Massa Específica Aparente do Minério</i>	t/m ³	2,00	2,00
<i>Vazão Volumétrica</i>	m ³ /h	420,00	30,17

Fonte: Autoria própria.

3.3 PROJETO DO CHUTE EM ESCALA

Para a construção do chute, foi utilizado o fator de escala previamente calculado. Com isso, o modelo em escala foi construído com as proporções reduzidas, em uma escala de 1:2,87 em relação à estrutura real. A estrutura do chute em tamanho real é composta por quatro módulos, como pode ser observado na Figura 45. Ao compararmos as dimensões do modelo em escala com as da estrutura real, é possível aplicar o fator de escala para determinar as dimensões geométricas necessárias.

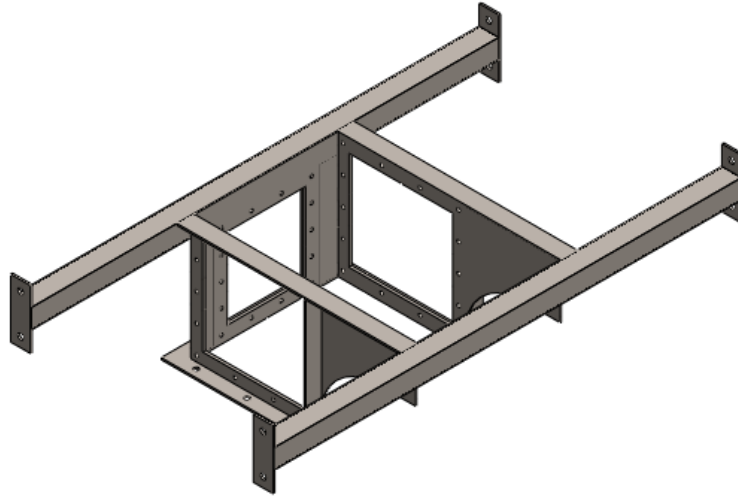
Figura 45. Comparação do chute do protótipo para o modelo.



Fonte: Autoria própria (2023).

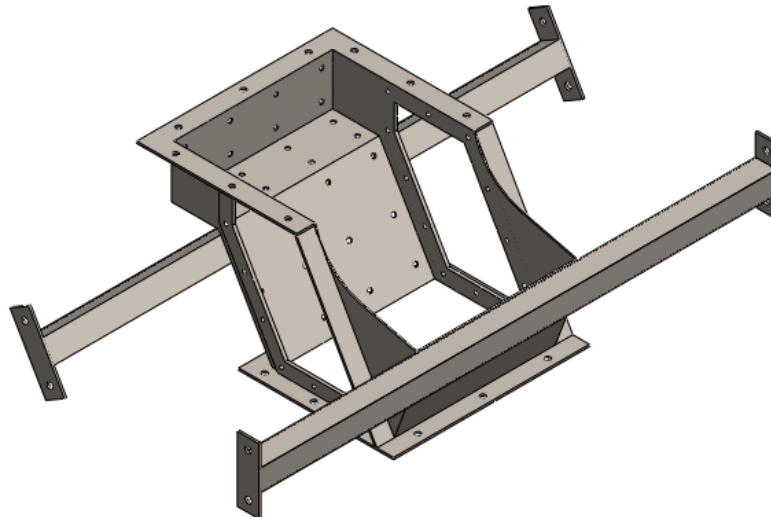
O chute é composto por quatro módulos, sendo que um desses módulos, cuja função no projeto original é acomodar o módulo de spray, será excluído por não interferir no percurso do material. Dessa forma, o chute será composto por três módulos. Então temos a Figura 46 sendo a capota, na Figura 47 temos o módulo intermediário e a bota na Figura 48. As partes vazadas foram o papel da porta de inspeção, que nesse caso é possível o acesso em qualquer parte do chute com uma fácil desmontagem, não sendo necessário abrir nem um tipo de porta, porém nas partes vazadas serão de acrílico, para que possa se observar o fluxo de material escoando.

Figura 46. Capota.



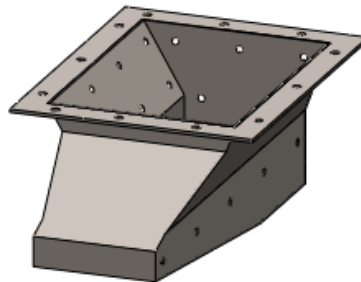
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 47. Módulo intermediário.



Fonte: Autoria própria (2023).

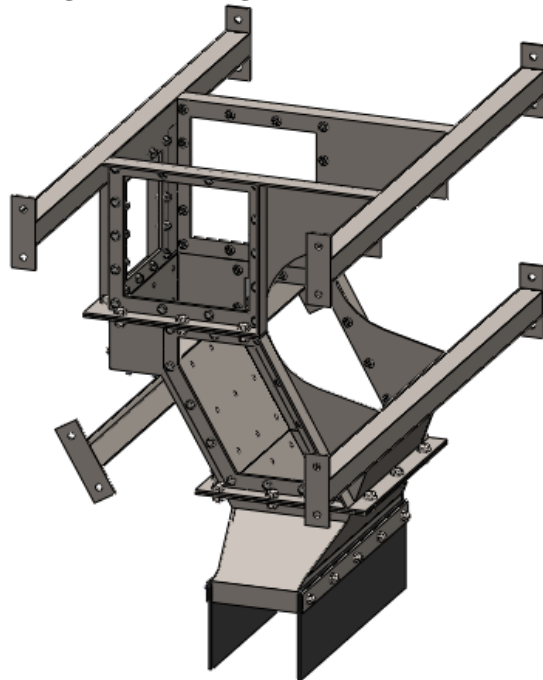
Figura 48. Bota.



Fonte: Autoria própria (2023).

A montagem do chute e apresentado na Figura 49 a seguir, na bota foram colocada guias laterais de acordo com o fator de escala para controla a altura de queda do material da bota para o TC inferior.

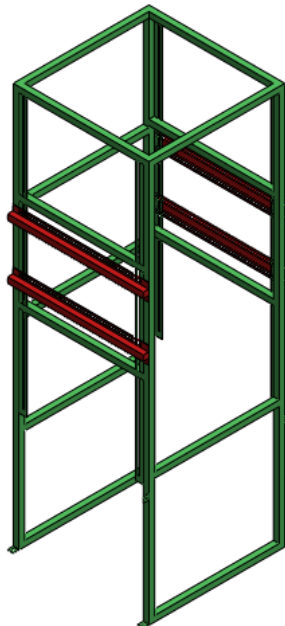
Figura 49. Montagem do modelo chute.



Fonte: Autoria própria (2023).

O chute será fixado em um suporte metálico, conforme exemplificado na Figura 5. É importante ressaltar que a fixação do chute no suporte é essencial para garantir a estabilidade e segurança do equipamento.

Figura 50. Suporte para o chute.

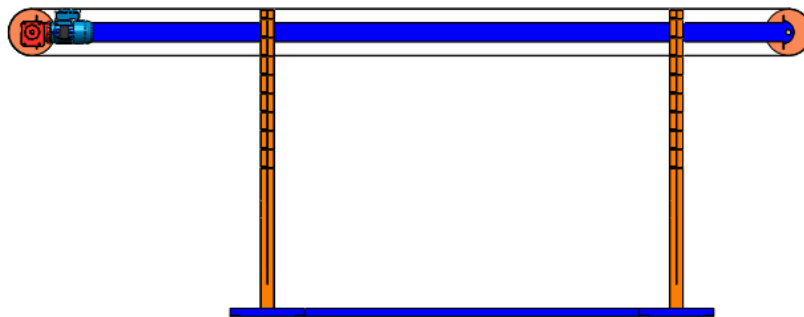


Fonte: Autoria própria (2023).

O chute conta com dois transportadores de correias do FluidPar, como apresentado anteriormente, o TC superior apresentado na Figura 15, e o TC inferior apresentado na Figura 16. Conforme apresentado anteriormente, o chute em questão será equipado com dois transportadores de correias disponíveis no FluidPar, sendo um deles o TC superior, ilustrado na Figura 15, e o outro o TC inferior, demonstrado na Figura 16. A utilização de dois transportadores de correias se faz necessária para garantir o fluxo de material contínuo, igualmente ao projeto original.

O transportador de correia inferior deverá ter um suporte que possa regular a semelhante ao transportador superior como apresentado na Figura 51.

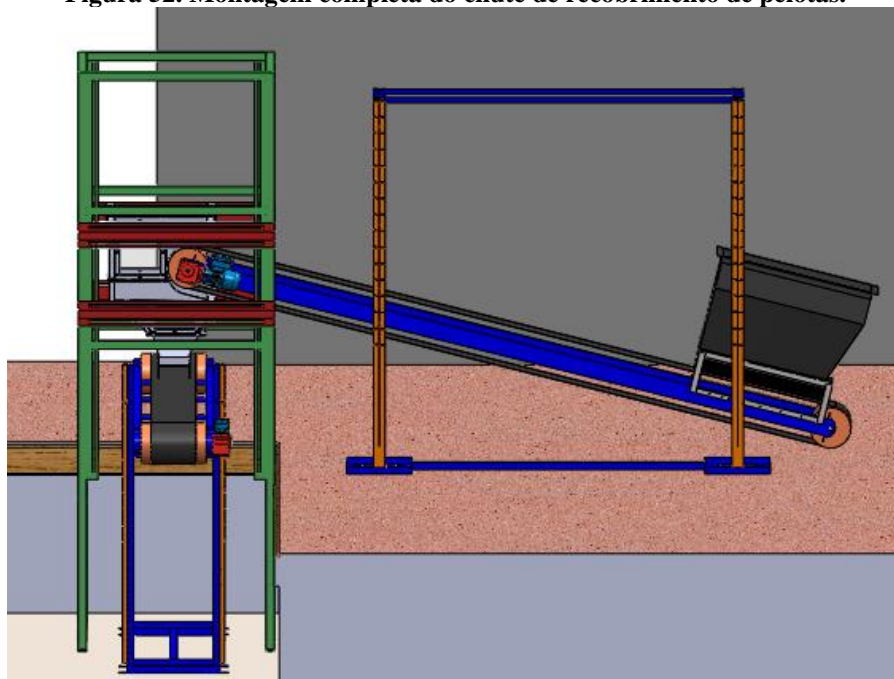
Figura 51. Correia inferior com base ajustável.



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 52 mostra a configuração de montagem completa do circuito de ensaio para o chute.

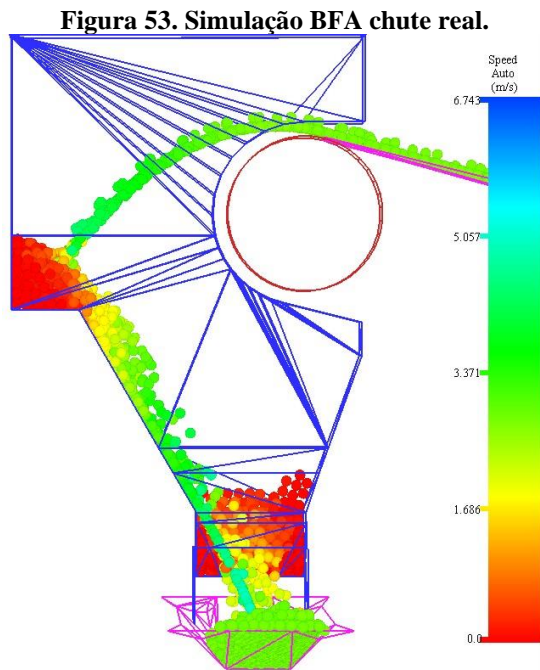
Figura 52. Montagem completa do chute de recobrimento de pelotas.



Fonte: Autoria própria (2023).

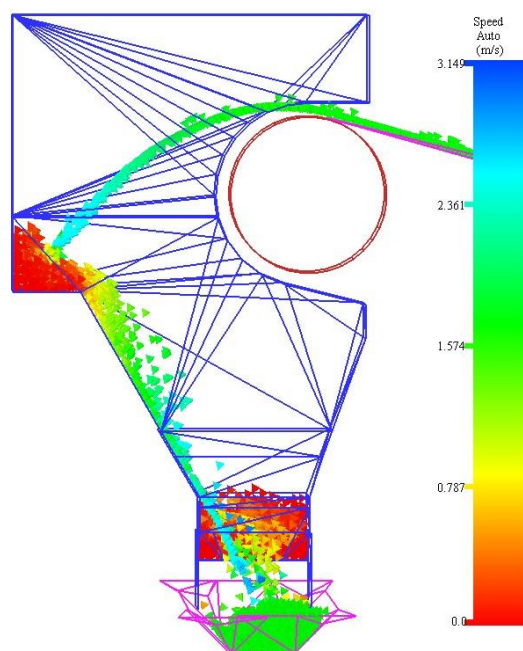
3.4 SIMULAÇÃO DEM

Com o objetivo de comparar o comportamento do material no chute, foram realizadas simulações em modelo real e em escala. Tanto o chute em tamanho real conforme apresentado na Figura 53, quanto o modelo em escala conforme demonstrado na Figura 54, tiveram um comportamento semelhante em relação ao fluxo de material na simulação.



Fonte: Autoria própria (2023).

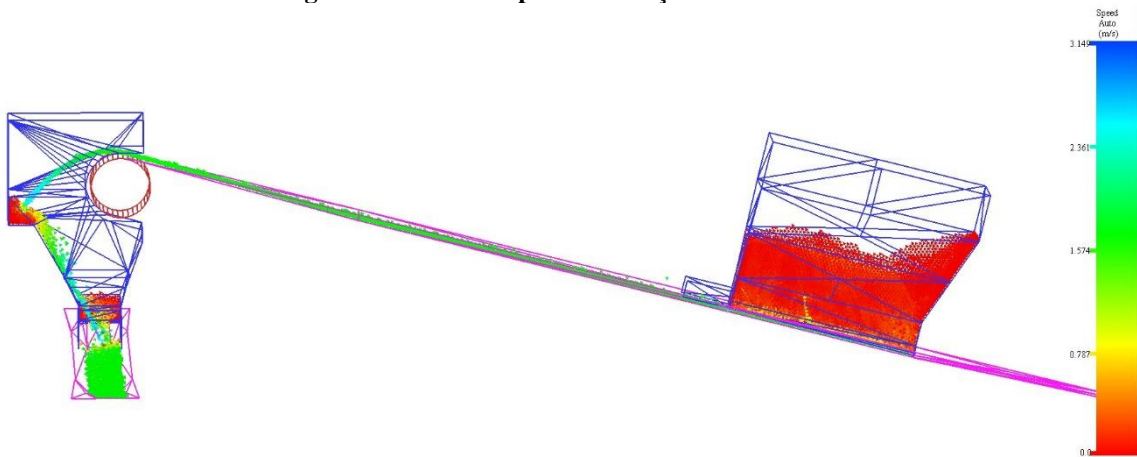
Figura 54. Simulação BFA chute modelo.



Fonte: Autoria própria (2023).

Com base nos cálculos de similaridade do modelo em escala, foi possível realizar uma análise por meio da simulação do *Bulk Flow Analyst*TM. Como resultado, foi viável visualizar o fluxo de material ao longo do chute, como ilustrado na Figura 55. Através dessa análise, tornou-se possível compreender a dinâmica do fluxo de material e avaliar possíveis pontos de obstrução ou acúmulo.

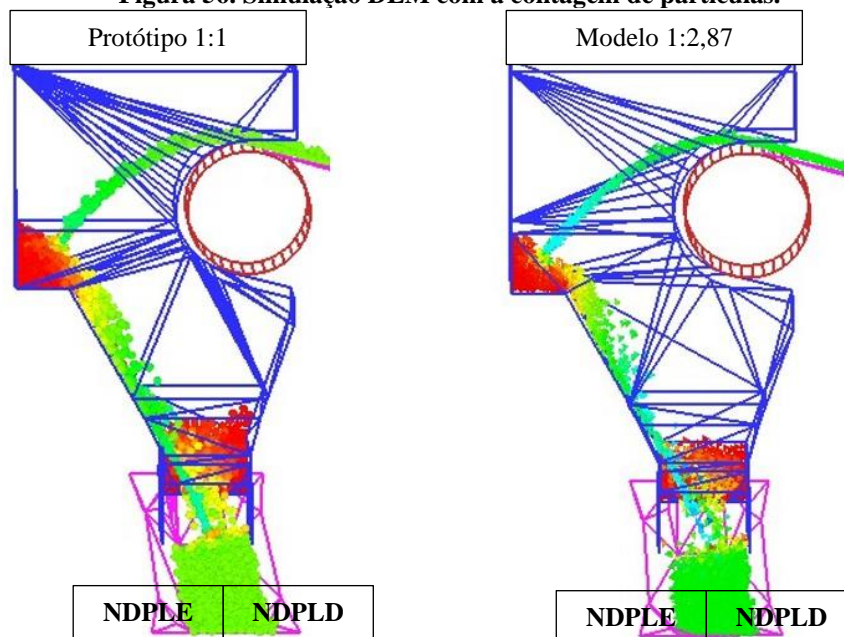
Figura 55. Vista completa simulação BFA modelo.



Fonte: Autoria própria (2023).

Foi inserido *portal* um em cada lado da correia, sendo a correia dividida ao meio, para fazer a contagem de partículas e saber o alinhamento da correia de acordo com o número de partículas que passam pelo portal, e também foi possível determinar a vazão real em se foi simulado o chute, o esquema do *portal* e possível visualizar na Figura 56.

Figura 56. Simulação DEM com a contagem de partículas.



Fonte: Autoria própria (2023).

Com a contagem das pelotas foi possível identificar um desalinhamento de 45,8% para o lado direito da correia devido à queda do material, como é possível observar na Figura 56 é uma vazão mássica de 832,62 t/h para o protótipo. E um desalinhamento de 46,7% para o lado direito da correia e uma vazão de 65,33 t/h, próxima à calculada na similaridade, para o modelo.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo o desenvolvimento de um modelo em escala de um chute de transferência de pelotas queimadas, com o intuito de realizar análises do recobrimento das pelotas de forma mais precisa e eficiente, buscando garantir a satisfação do cliente em seu uso final.

Para alcançar esse objetivo, foi dimensionado o modelo em escala de um chute já presente na linha de produção de pelotas da VALE, responsável por direcionar o fluxo de material do TC superior que carrega a carga direto da usina de pelotização. Nesse processo, as pelotas são resfriadas, recobertas com bauxita e, no lançamento do material, recobertas com glicerina no chute de transferência. O caminho do material segue da bota do chute até o TC empilhamento, onde as pelotas são estocadas no pátio.

O modelo em escala do chute em questão é importante para realizar a análise do recobrimento das pelotas de maneira mais fiel ao protótipo da indústria, uma vez que atualmente não há um controle absoluto do recobrimento das pelotas, tanto com glicerina quanto com bauxita. A aplicação da bauxita é realizada por meio de um pulverizador bico de pato, o que causa um grande desperdício de bauxita no processo e não tem tanta eficácia no recobrimento de área total das pelotas, que é de suma importância para o cliente em uso final. Além disso, a aplicação de glicerina após o recobrimento com bauxita pode não ser a melhor maneira para o processo, uma vez que a aplicação incorreta pelos pulverizadores pode retirar parte do recobrimento com bauxita e a eficiência no recobrimento com glicerina pode não estar adequada.

Com o modelo em escala desenvolvido, poderá ser realizada de maneira experimental uma análise detalhada de cada ponto de escoamento e recobrimento do fluxo de pelotas no chute de transferência, permitindo a implementação de novas técnicas para o recobrimento de forma mais eficiente e precisa. Assim, será possível garantir a qualidade das pelotas produzidas e a satisfação do cliente em seu uso final.

A simulação numérica no método DEM permitiu a visualização do fluxo de material, sendo possível observar o acúmulo de material nas caixas de pedra do chute, local em que

ocorre o impacto mais crítico. Além disso, foi possível visualizar o fluxo de material ao longo dos transportadores de correias. A simulação no BFA teve papel fundamental neste trabalho, uma vez que foi possível visualizar o desalinhamento na correia do TC inferior devido à queda do material do chute, o que resulta em uma vazão de material menor e comparação do protótipo com modelo onde foi apontado a similaridade até mesmo no desalinhamento. A correção no chute não foi realizada devido a possibilidade de estudos futuros para tratar do desalinhamento da correia e da regulagem móvel no chute, que controlaria a queda de material e, conseqüentemente, o desalinhamento da correia. A simulação numérica também permitiu visualizar as áreas de impacto, nas quais foram realizados estudos de chapas de desgaste.

Dessa forma, o dimensionamento do modelo do chute de transferência de pelotas possibilitou a montagem completa de um laboratório para estudos de recobrimento de pelotas, análise de transportadores de correias, estudos sobre chutes de transferência e desgaste dos mesmos, bem como estudos da melhor geometria de construção, utilizando técnicas reais da indústria para a resolução de problemas. O nome "chute de pelotas" foi dado em referência ao material transportado no protótipo, porém, outros materiais a granel podem ser utilizados para estudos e ensaios. Assim, conclui-se que o estudo foi bem-sucedido e atingiu todos os objetivos inicialmente propostos, além de permitir o desenvolvimento de novos ramos de estudos.

4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros pode se aplicar estudo relacionados ao chute e os transportadores de correias, sendo eles:

- Realizar a construção e ensaios experimentais no chute;
- Estudo do material da construção do chute;
- Realizar estudos envolvendo o recobrimento de pelotas;
- Realizar pesquisas relacionadas as placas de desgaste;
- Realizar estudos em relação a queda do material granular, com o alinhamento do transportador de correia.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, J. P. S. G. **Avaliação do efeito da temperatura na morfologia do ferro metálico e na formação da colagem em diferentes tipos de pelotas de redução direta**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- ALENCAR, Jean Philippe Santos Gherardi *et al.* **O processo de redução direta no contexto da descarbonização da siderurgia e a busca por soluções tecnológicas de agentes de recobrimento para pelotas de minério de ferro**. 2021. 121.f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais de Minas) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS-UFMG, 2021.
- ARBOLEDA, D.; RESTREPO, G. Effect of particle shape on the angle of repose and segregation of granular materials. **Powder Technology**. V. 360, p. 904-913, 2020.
- ARNOLD, P.C. *et al.* Best practice design, maintenance and operation of chutes for material transfer systems. **Procedia Engineering**, v. 199, p. 4-17, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, Brasil, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, Brasil, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6172**. Transportadores contínuos – Transportadores de correia – Tambores. Rio de Janeiro, 1995.
- BASKAR, B.; CHANDRAMOHAN, G.; NAGARAJAN, R. CFD modeling of flow pattern in a transfer chute. **Powder Technology**, v. 233, p. 201-209, 2013.
- BIAN, X., WANG, G., WANG, H., WANG, S., LV, W. Effect of lifters and mill speed on particle behaviour, torque, and power consumption of a tumbling ball mill: Experimental study and DEM simulation", **Minerals Engineering**, v. 105, p. 22-35, 2017.
- CASTRO, L. B. *et al.* Avaliação do desempenho de chutes de transferência em correias transportadoras. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, e12656, 2020.
- CASTRO, M.M.. **Experimento em escala de emissão de poeira no processo de empilhamento**. 2022. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2022.
- CEMA. **Belt Conveyors for Bulk Materials**. 6ª ed. 2ª impressão. [S.l.]: Conveyor Equipment Manufacturers Association, 2009.
- ÇENGEL, YUNUS A.; CIMBALA, JOHN M. **Mecânica dos fluidos: Fundamentos e aplicações**, Porto Alegre: AMGH, 2012.
- CHAKRABORTY, S.; KUMAR, S.; MANDAL, S. A Review on Angle of Repose of Granular Materials. **Particulate Science and Technology**. V. 39, n. 5, p. 441-454, 2021.

CHEN, W.; SANTOS, R. L. Análise dimensional e similitude aplicadas a processos de separação por membranas. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 10, n. 1, p. 1-17, 2017.

CLEARY, P. W. DEM prediction of industrial and geophysical particle flows", *Particuology*, v.8, pp. 106-118, 2010.

CORNACCHIA, L.; GOMES, L. A. V.; BORGES, G. R.; MARZAN, A. J. Determination of bulk density of granular materials: a comparative study of four methods. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1573, n. 1, p. 012070, 2020.

COSTA, R. V. P. da. **Otimização da resistência à compressão de pelotas de minério de ferro para redução direta pela aplicação de projeto robusto**. 2008. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. **Geotechnique**, v. 29, n. 1, p. 47-65, 1979.

DANTAS, J. A. C. M. **Transportadores de correia: desenvolvimento e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

DINIZ, B. C.; BASTOS, P. W. C. **Transportadores de correia: tipos, projetos, componentes e simulação computacional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. ISBN: 978-8-5352701-6-9.

DROZDA, F.O. **Desenvolvimento in situ de revestimentos cerâmicos de alumina pelo processo de plasma com arco transferido**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

FONSECA, V. O.; CAMPOS, A. R. DE. Aglomeração. In: **Tratamento de Minérios**. 6° ed. p. 677–724. CETEM. Rio de Janeiro, 2018.

FREITAS *et al.*, **Análise dimensional e aplicação hidráulica do Teorema PI de Buckingham**. *Revista de Ciências Exatas e Engenharias*, v. 25, n. 2, p.84-101, 2015.

GAVI, J. P. **Manual de inspeção e manutenção de correias transportadoras**. 4. ed. Vitória, 2012. **Granel. Martin Engineering**, Ltda, 2012. Brasil: 2012. ISBN: 978-0-9717121-1-9.

JENG, D.S., SONG, M.C., YU, W.T. (2018). Design and analysis of a rock box in a transfer chute using DEM and FEM. **Minerals Engineering**, v.126, p. 63-71, 2018.

LI, M.; XU, S.; QI, H.; YU, L.; HU, Z.; ZHAO, X. Evaluation of the bulk density of granular and powdered materials using a modified single-ball indentation test. **Powder Technology**, v. 385, p. 299-310, 2021.

MACIAS, P; ROCHA, D. **Projeto de transportadores de correia e chutes de transferência através de pacotes computacionais**. Belém: 2012, 131f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

MEDHAT, M.E., ESSAM, A.M., EL-WAKEEL, M. (2020). Design and analysis of a modular chute transfer system. **Powder Technology**, v.370, p. 436-446, 2020.

MESQUITA, Hugo. **Análise do efeito de escala entre a calibração e aplicação industrial do método DEM**. 2016. Dissertação (Programa de pós-graduação em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

MOURÃO, José Murilo. Aspectos conceituais relativos à pelletização de minérios de ferro. **ABM Proceedings**, v. 1407, p. 243, 2017.

MUNIR, J. **Análise da Seleção de Transportadores Contínuos de Correia Utilizados em Mineração**. 2018. 62 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

OVERLAND CONVEYOR COMPANY. **Belt analyst™ product Documentation**. Colorado, 2007.

PAL, J.K. *et al.* Performance evaluation of iron ore fines coated with bauxite and glycerol mix. **Journal of Mining and Metallurgy B: Metallurgy**, v. 57, n. 1, p. 45-51, jun. 2021.

PINTO, L. F. R. *et al.* Influência do teor de umidade no comportamento mecânico do concreto com agregados reciclados. In: Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído, 19., 2019, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte: ENTAC, 2019.

PIQUET, C. V. **Desenvolvimento de um laboratório de transportadores de correia em escala**. **Universidade Federal do Pará**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – UFPA, ITEC, Belém-PA, 2015.

PONTES, Viviane Reis. **O processo de pelletização do minério de ferro como hipótese de consumo na sistemática de cobrança da CFEM**. 2020. 109 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Direito) – Instituto Brasileiro de Ensino, Desenvolvimento e Pesquisa, Brasília, 2020.

ROBERTS, A.W. Material handling in the process industries. **Chemical Engineering Progress**, v. 114, n. 4, p. 38-44, 2018.

ROCHA, D.M.; MACIAS, P.H.S.. **PROJETO DE TRANSPORTADORES DE CORREIA E CHUTES DE TRANSFERÊNCIA ATRAVÉS DE PACOTES COMPUTACIONAIS**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2012.

SANTOS, E. R. **Análise de desempenho de bota de alimentação em transportador de correia**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

SWINDERMAN, R; MARTI, A; GOLDBECK, L; MARSHALL, D. **Foundations™: Guia Prático para um Controle mais Limpo, Seguro e Produtivo de Pó e Material a Granel**, 4ª ed.. Martin Engineering, Ltda: Neponset, Illinois, 2012.

TAKANO, Cyro; MOURAO, Marcelo Breda; CASTRO, JA de. Aspectos fenomenológicos que afetam o processo de auto-redução de minérios de ferro. **47º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas**, n. 47, p. 112-124, 2017.

TAVARES, L.M. *et al.* A comparative study of different strategies for chute blockage detection in a mineral processing plant. **Minerals Engineering**, v. 169, p. 106831, 2021.

ULUSOY U. A Review of Particle Shape Effects on Material Properties for Various Engineering Applications: From Macro to Nanoscale. **Minerals**. V. 13, p. 1-91, 2023.

VALE S/A. **Processo de inibição de emissão de particulados durante atrito de pelotas de minério de ferro tratadas termicamente**. BR nº PI 0903986-4, 20 abril 2009, 17 out. 2019.

VALE S/A. **Infográfico acerca do processo de extração do minério de ferro de Carajás-PA**. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/business/mining/iron-orepellets/Documents/carajas/index.html>>. Acesso em: 08 de maio de 2020.

VIGA. **Transportador de correia**. Disponível em: <https://viga.ind.br/produto/correia_transportadora_industrial/>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2023.

VIOTTI, Carolina Lopes Ganz. **Avaliação de potenciais materiais refratários como agentes de coating**. 2020. Trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia de materiais) - Departamento de engenharia de materiais, Centro federal de educação tecnológica de Minas Gerais, Minas Gerais, 2020.

WHITE, F. M.. **Mecânica dos fluidos**. Mc Graw Hill Brasil, 2015.

ZANIN, J. L. C. *et al.* Transportadores de Correia: Manutenção Preventiva e Monitoramento Online. In: Congresso Brasileiro de Manutenção e Gestão de Ativos, 2020, Florianópolis. **Anais eletrônicos do XXI CBMGA**. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Manutenção e Gestão, 2020.

APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO

Faz-se a aplicação do teorema π de Buckingham para analisar-se um escoamento de partículas uma correia de transferência. Sabe-se que as forças do escoamento dependem de:

- Taxa de fluxo de massa (\dot{m});
- Densidade (ρ);
- Aceleração da gravidade (g);
- Diâmetro da partícula (D);
- Comprimento característico (l);
- Velocidade da correia (v);
- Ângulo de repouso (α);
- Fator de forma da partícula (Sf);

Assim, tem-se:

$$F = f(\rho, g, D, l, v, Sf, \dot{m}, \alpha), n = 8 \quad (1)$$

As grandezas analisadas têm as seguintes dimensões primárias (m=massa, L=comprimento e t=tempo):

- Taxa de fluxo de massa (\dot{m}) – $[m^1 L^0 t^{-1}]$
- Densidade (ρ) – $[m^1 L^{-3} t^0]$
- Aceleração da gravidade (g) – $[m^0 L^1 t^{-2}]$
- Diâmetro da partícula (D) – $[m^0 L^1 t^0]$
- Comprimento característico (l) – $[m^0 L^1 t^0]$
- Velocidade da correia (v) – $[m^0 L^1 t^{-1}]$
- Ângulo de repouso (α) – $[m^0 L^0 t^0]$
- Fator de forma da partícula (Sf) – $[m^0 L^0 t^0]$

Observando-se as dimensões das variáveis, define-se o sistema de grandezas fundamentais. Assim, $j = 3$. Reescrevendo a eq. (1):

$$0 = f(\rho, g, D, l, v, Sf, \dot{m}, \alpha) \quad (2)$$

Escolhe-se a densidade, comprimento característico e a velocidade da correia como grupo de parâmetros. Como o fator de forma (Sf) e o ângulo de repouso (α) já são grandezas adimensionais estes já são um número π por si mesmos π_1 e π_2 , respectivamente, logo se define três grupos π para análise:

$$\pi_3 = \rho^a v^b l^c D \quad (3)$$

$$\pi_4 = \rho^d v^e l^f g \quad (4)$$

$$\pi_5 = \rho^g v^h l^i \dot{m} \quad (5)$$

Então, faz-se a análise dimensional das três equações anteriores, chegando às equações acima.

$$[m^0 L^0 t^0] = [m^a L^{-3a} t^0] [m^0 L^b t^{-b}] [mm^0 L^c t^0] [m^0 L^1 t^0] \quad (6)$$

$$[m^0 L^0 t^0] = [m^d L^{-3d} t^0] [m^0 L^e t^{-e}] [mm^0 L^f t^0] [m^0 L^1 t^{-2}] \quad (7)$$

$$[m^0 L^0 t^0] = [m^a L^{-3a} t^0] [m^0 L^b t^{-b}] [mm^0 L^c t^0] [m^0 L^1 t^0] \quad (8)$$

Assim, para cada equação, faz-se a análise de cada grandeza fundamental separadamente, chegando se a 3 equações para cada equação anterior:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Massa:} \\ \text{Comprimento:} \\ \text{Tempo:} \end{array} \right\} \begin{array}{l} 0 = a \\ 0 = -3a + b + c + 1 \\ 0 = -b \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} a = 0 \\ b = 0 \\ c = -1 \end{array} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Massa:} \\ \text{Comprimento:} \\ \text{Tempo:} \end{array} \right\} \begin{array}{l} 0 = d \\ 0 = -3d + e + f + 1 \\ 0 = -e - 2 \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} d = 0 \\ e = -2 \\ f = 1 \end{array} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Massa:} \\ \text{Comprimento:} \\ \text{Tempo:} \end{array} \right\} \begin{array}{l} 0 = g + 1 \\ 0 = -3g + h + i \\ 0 = -h - 1 \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} g = -1 \\ h = -1 \\ i = -2 \end{array} \right\} \quad (11)$$

Resolvendo as nove equações, e substituindo os resultados para determinar os grupos adimensionais, tem-se:

$$\pi_3 = \rho^0 v^0 l^{-1} D \quad (12)$$

$$\pi_4 = \rho^0 v^{-2} l^1 g \quad (13)$$

$$\pi_5 = \rho^{-1} v^{-1} l^{-2} \dot{m} \quad (14)$$

Obtém-se:

$$\pi_1 = S_f \quad (15)$$

$$\pi_2 = \alpha \quad (16)$$

$$\pi_3 = \frac{D}{l} \quad (17)$$

$$\pi_4 = \frac{lg}{v^2} = \left(\frac{lg}{v^2} \right)^{\left(-\frac{1}{2}\right)} = \frac{v}{\sqrt{lg}}, \text{Número de Froude} \quad (18)$$

$$\pi_5 = \frac{\dot{m}}{\rho v l^2} \quad (19)$$

Usa-se a relação da vazão volumétrica que é dada por:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (20)$$

Assim, pode-se escrever este último grupo eq. (19) como o número de capacidade:

$$C = \frac{Q}{vl^2} \quad (21)$$

O número de Froude, que aparece em toda a literatura sobre o fluxo granular, expressa a relação entre as forças inerciais e gravitacionais. Para escoamento não coesivo a similaridade recai no emprego do número de Froude, e considerando que para um sistema de transferência de um material granular inicialmente em repouso a correia transportadora superior, tem-se que:

$$v = \sqrt{2gl} \quad (22)$$

Substituindo esta expressão na eq. (18), tem-se:

$$Fr = \frac{\sqrt{2gl}}{\sqrt{lg}} \quad (23)$$

$$Fr = \left(\frac{\sqrt{2gl}}{\sqrt{lg}} \right)_M = \left(\frac{\sqrt{2gl}}{\sqrt{lg}} \right)_P \quad (24)$$

$$\left(\frac{\sqrt{2gl_M}}{\sqrt{l_M g}} \right) = \left(\frac{\sqrt{2gl_P}}{\sqrt{l_P g}} \right) \quad (25)$$

$$\left(\frac{\sqrt{2gl_M}}{\sqrt{2gl_P}} \right) = \left(\frac{\sqrt{l_M g}}{\sqrt{l_P g}} \right) \quad (26)$$

$$\frac{\sqrt{l_M}}{\sqrt{l_P}} = \frac{\sqrt{l_M}}{\sqrt{l_P}} \quad (27)$$

$$\sqrt{\frac{l_M}{l_P}} = \sqrt{\frac{l_M}{l_P}} \quad (28)$$

$$\left(\sqrt{\frac{l_M}{l_P}} \right)^2 = \left(\sqrt{\frac{l_M}{l_P}} \right)^2 \quad (29)$$

$$\frac{l_P}{l_M} = \lambda \quad (30)$$

Com isso pode-se fazer uso das duas equações adimensionais muito importantes, no caso Número de Froude que representa a razão entre as forças de inércia sobre força gravitacional eq. (18) e o Número Capacidade que é a razão entre a vazão volumétrica sobre a velocidade pela secção de área da correia eq. (21), fazendo a devida igualdade do protótipo para o modelo em escala, pode-se tirar informações importantes para similaridade do escoamento real com relação ao modelo em escala, apenas usando artifícios matemáticos pra isolar dados importantes, como velocidade do modelo (v_M) eq. (25):

$$Fr = \left(\frac{v}{\sqrt{lg}} \right)_M = \left(\frac{v}{\sqrt{lg}} \right)_P \quad (31)$$

$$Fr = \frac{v_M}{\sqrt{l_M}} = \frac{v_P}{\sqrt{l_P}} \quad (32)$$

$$v_M = \frac{v_P}{\sqrt{l_P}} \sqrt{l_M} = v_P \frac{\sqrt{l_M}}{\sqrt{l_P}} = v_P \sqrt{\frac{l_M}{l_P}} \quad (33)$$

$$v_M = v_P \sqrt{\frac{1}{\lambda}} \quad (34)$$

Fazendo o mesmo com a eq. (21) do Número Capacidade e substituindo a equação anterior, determina-se a vazão volumétrica do modelo (Q_M) eq. (26).

$$C = \left(\frac{Q}{vl^2} \right)_M = \left(\frac{Q}{vl^2} \right)_P \quad (35)$$

$$\left(\frac{Q_M}{v_M l_M^2} \right) = \left(\frac{Q_P}{v_P l_P^2} \right) \quad (36)$$

$$Q_M = \frac{Q_P}{c_P l_P^2} v_M l_M^2 \quad (37)$$

Substituindo na eq. (37), v_M pela eq. (34), tem-se:

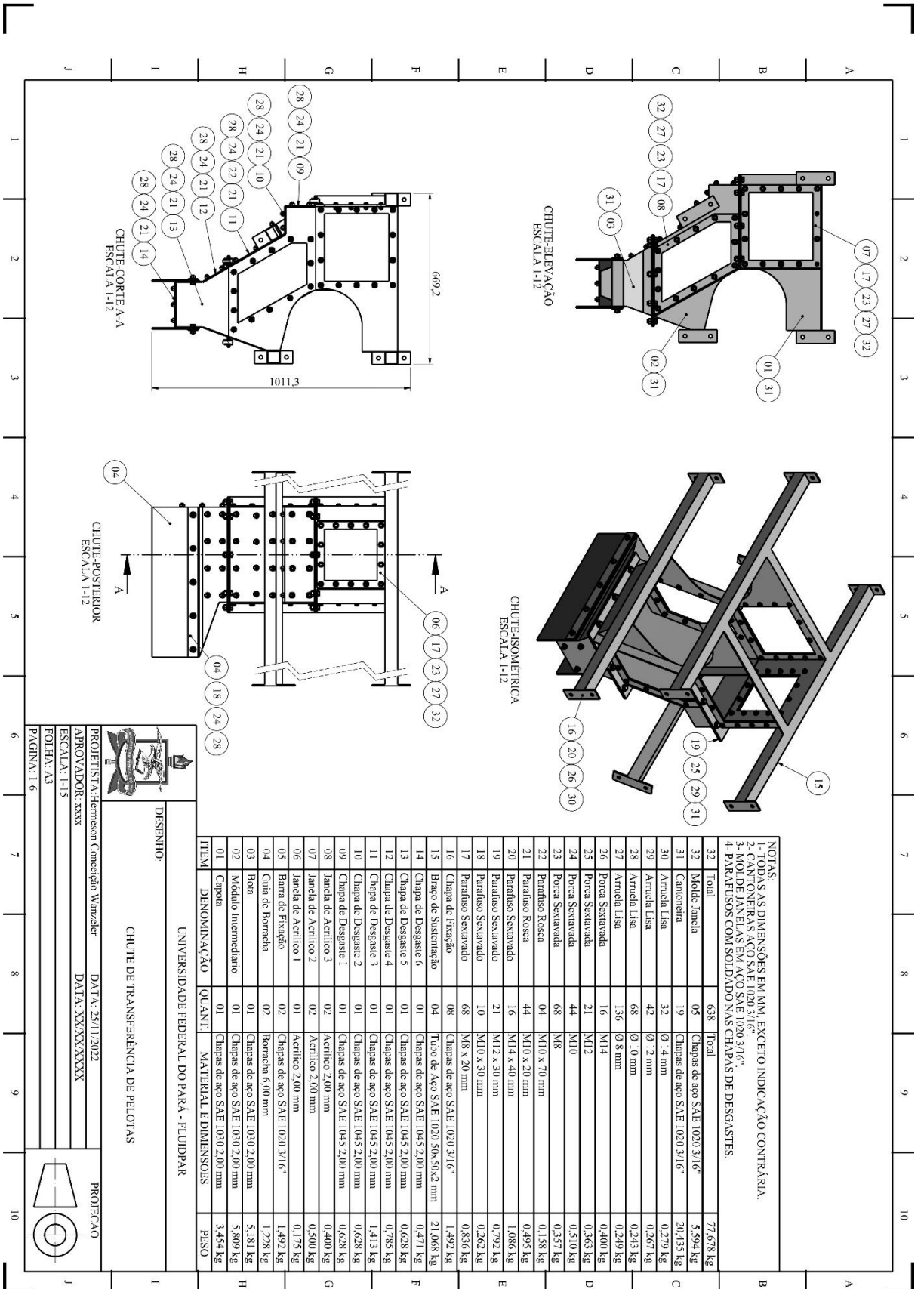
$$Q_M = \frac{Q_P}{v_P l_P^2} v_P \sqrt{\frac{l_M}{l_P}} \cdot l_M^2 = \frac{Q_P}{v_P l_P^2} v_P \left(\frac{l_M}{l_P} \right)^{\frac{1}{2}} l_M^2 \quad (38)$$

$$Q_M = \frac{Q_P}{l_P^2} \frac{l_M^{\frac{1}{2}}}{l_P^{\frac{1}{2}}} l_M^2 = Q_P \left(\frac{l_M}{l_P} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{l_M^2}{l_P^2} \quad (39)$$

$$Q_M = Q_P \left(\frac{l_M}{l_P} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{l_M}{l_P} \right)^2 \quad (40)$$

$$Q_M = Q_P \left(\frac{l_M}{l_P} \right)^{\frac{5}{2}} = \frac{Q_P}{\lambda^{\frac{5}{2}}} \quad (41)$$

APÊNDICE B – PROJETO DO CHUTE DE TRANSFERÊNCIA DE PELOTAS



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - FLUIDPAR

DESENHO: CHUTE DE TRANSFERÊNCIA DE PELOTAS

PROF. EST. A. Hermesson Conceição Wanderler DATA: 25/11/2022

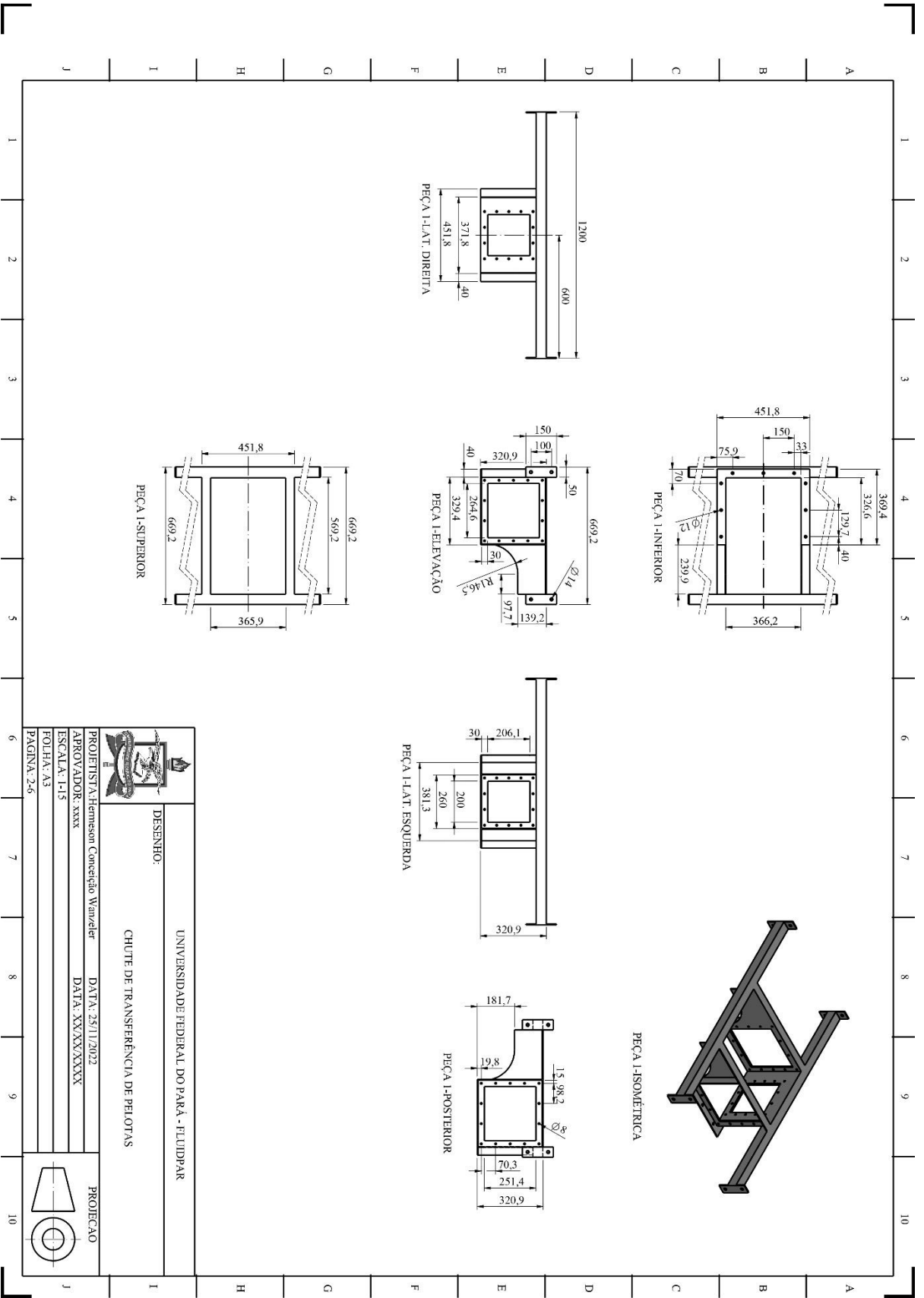
APROVADOR: xxxx DATA: XX/XX/XXXX


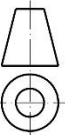
ESCALA: 1-15

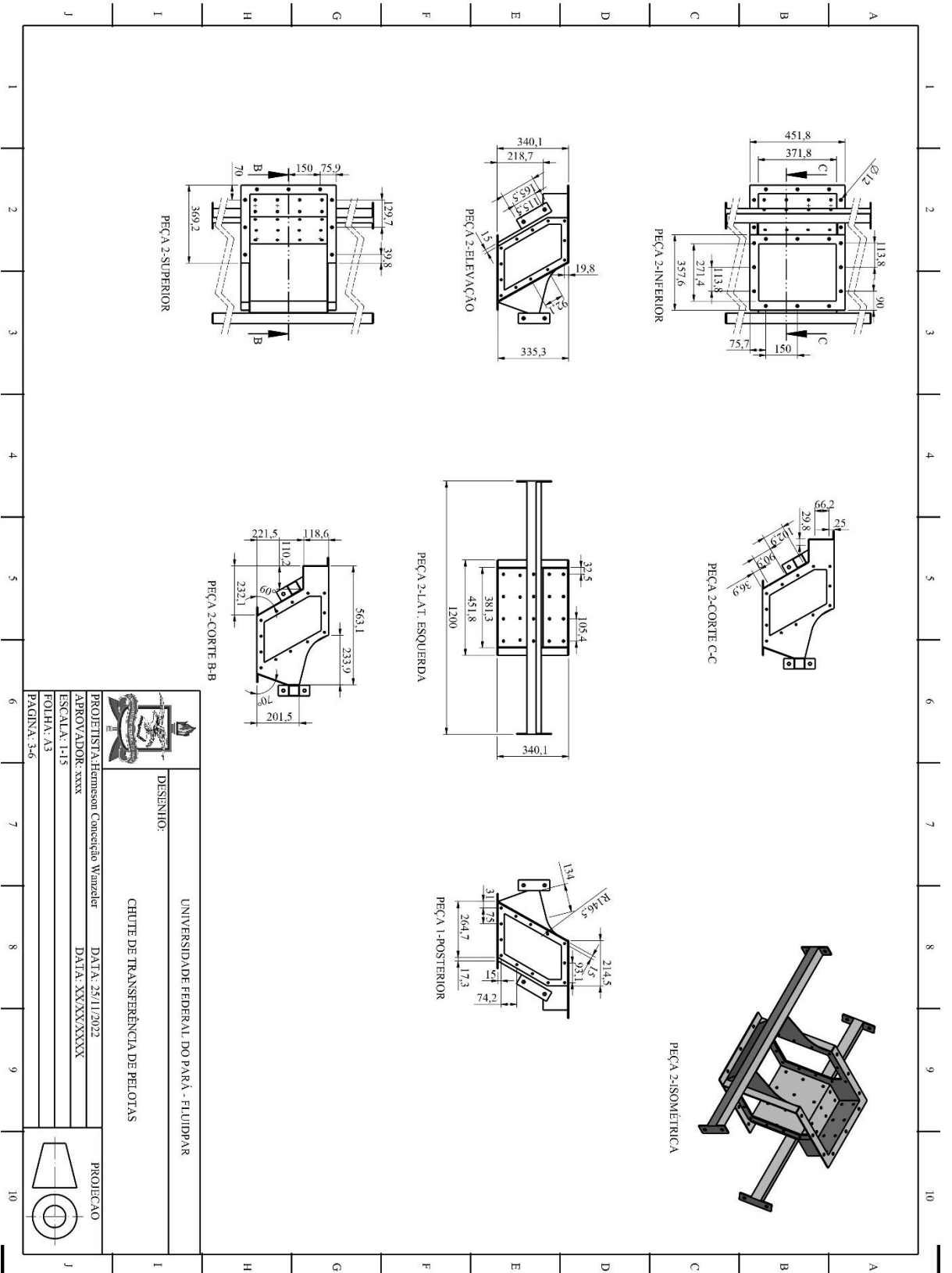
FOLHA: A3

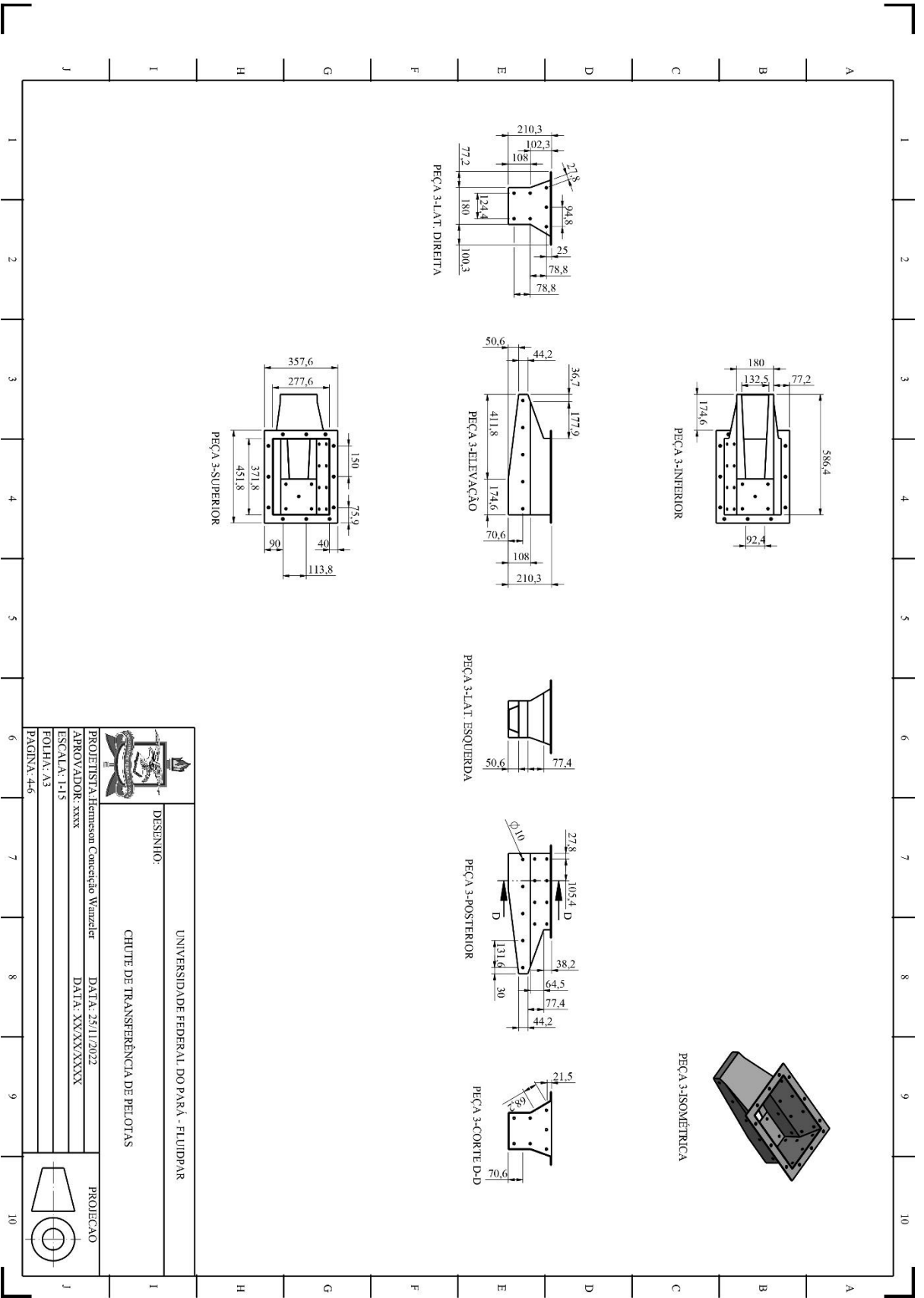
PÁGINA: 1-6

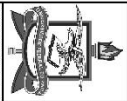

PROJEÇÃO

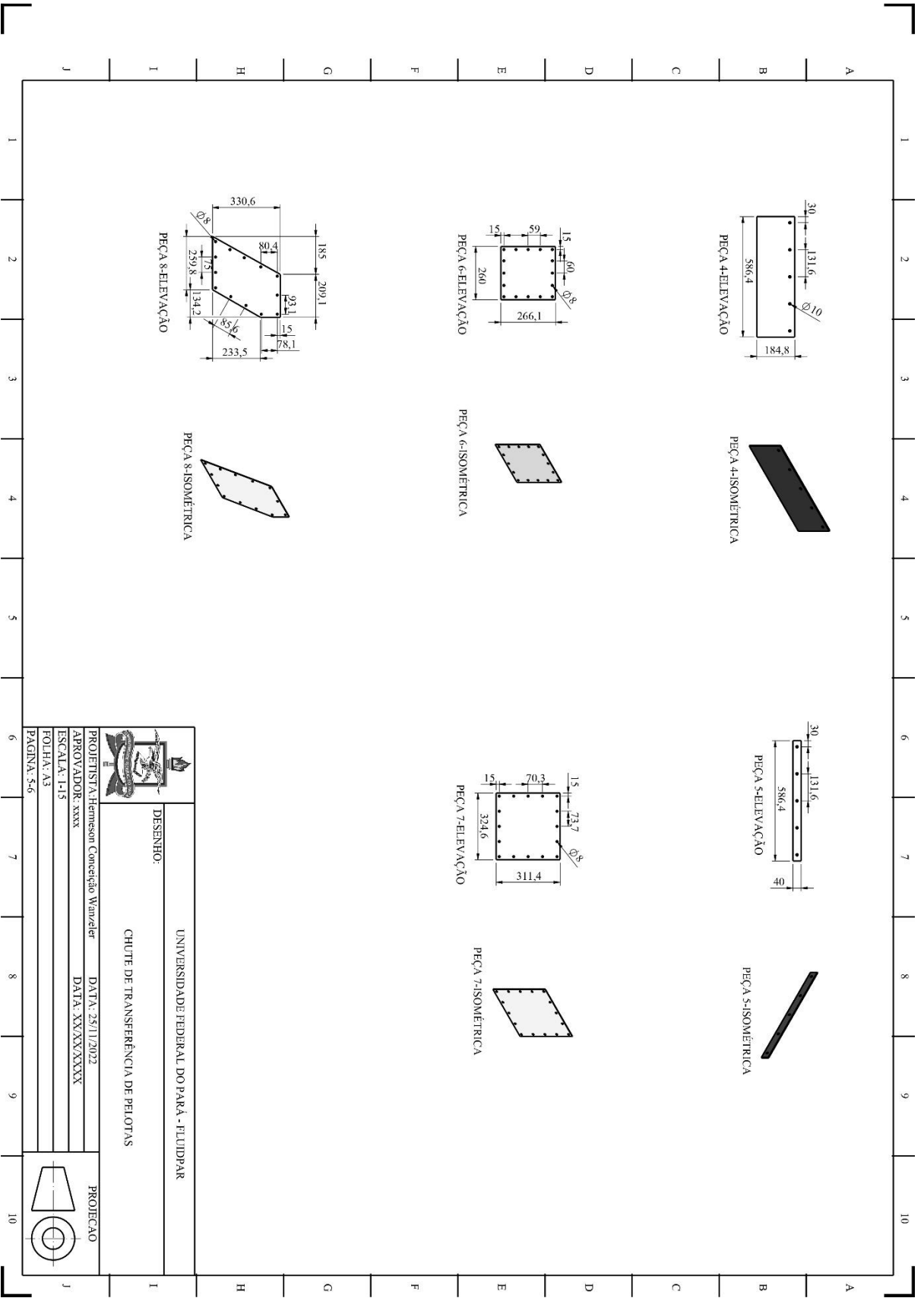


	
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - FLUIDPAR	
DESENHO:	CHUTE DE TRANSFERÊNCIA DE PELotas
PROJETISTA: Hermesom Conceição Wanderler	DATA: 25/11/2022
APROVADOR: xxxx	DATA: XX/XX/XXXX
ESCALA: 1-15	
FOLHA: A3	
PÁGINA: 2-6	
PROJEÇÃO	
	

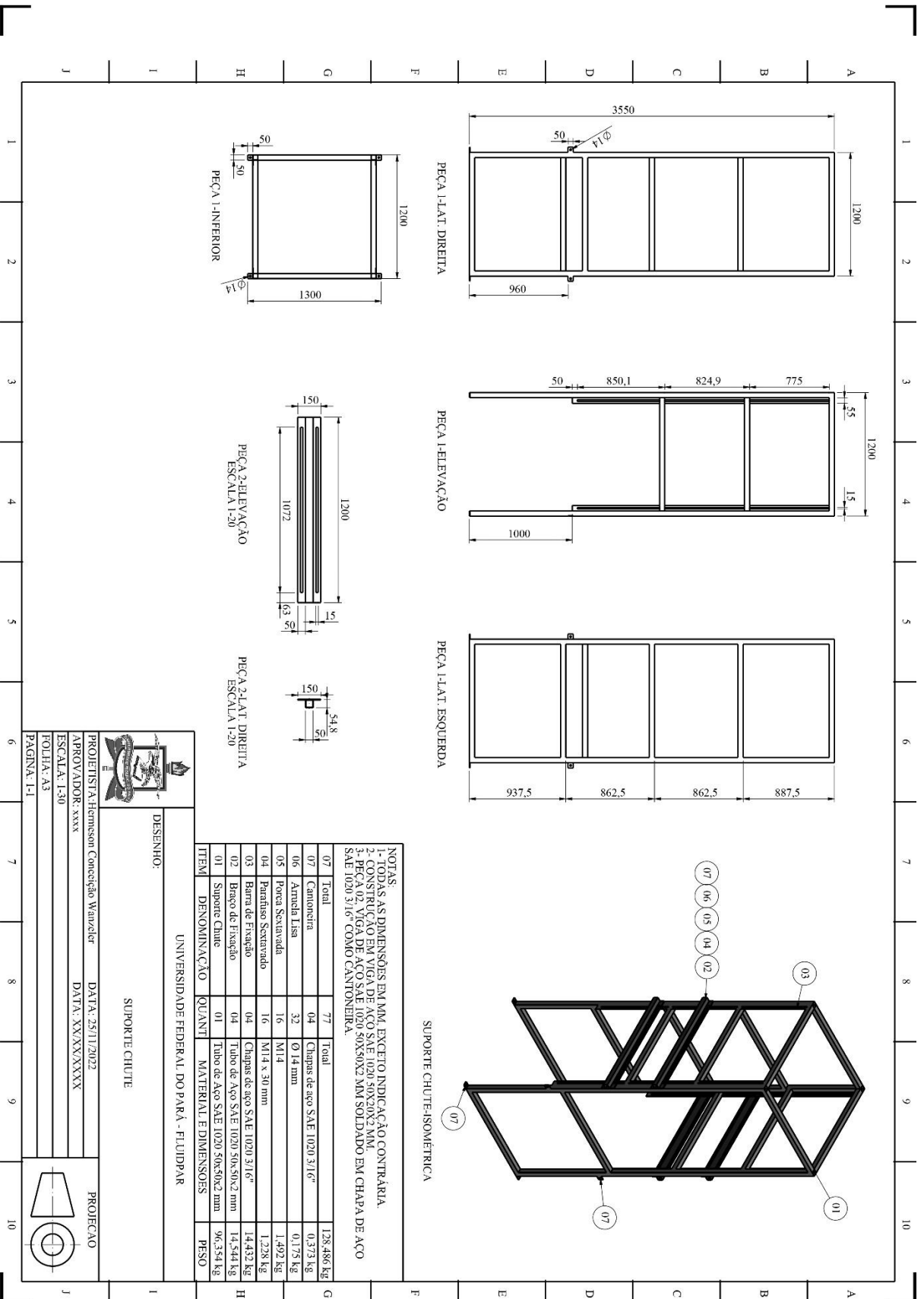




	
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - FLUIDPAR	
DESENHO:	CHUTE DE TRANSPERÊNCIA DE PELOTAS
PROJETAISTA: Hermesson Conceição Wanzel	
APROVADOR: xxxx	DATA: 25/11/2022
ESCALA: 1-15	DATA: XXXXX/XXXX
FOLHA: A3	
PÁGINA: 4-6	
PROJECAO	
	



APÊNDICE C – PROJETO DO SUPORTE DO CHUTE



NOTAS:
 1- DIMENSÕES EM PAU EXCETO INDICAÇÃO CONTRÁRIA
 2- CONSTRUÇÃO EM VIGA DE AÇO SAE 1020 50X50X2 MM
 3- PEÇA 02 VIGA DE AÇO SAE 1020 50X30X2 MM SOLDADO EM CHAPA DE AÇO SAE 1020 3/16" COMO CANTONEIRA.

ITEM	DENOMINAÇÃO	QUANT	MATERIAL E DIMENSÕES	PESO
07	Total	77		128,486 kg
07	Cantoneira	04	Chapas de aço SAE 1020 3/16"	0,373 kg
06	Armeia Lisa	32	Ø 14 mm	0,175 kg
05	Porca Sextavada	16	M14	1,492 kg
04	Parafuso Sextavado	16	M14 x 30 mm	1,238 kg
03	Barra de Fixação	04	Chapas de aço SAE 1020 3/16"	14,432 kg
02	Braco de Fixação	04	Tubo de Aço SAE 1020 50x50x2 mm	14,344 kg
01	Supporte Chute	01	Tubo de Aço SAE 1020 50x50x2 mm	96,354 kg

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - FLUIDPAR

DESENHO: SUPORTE CHUTE

PROJETISTA: Herisson Conceição Wanderler DATA: 25/11/2022

APROVADOR: xxxx DATA: XX/XX/XXXXXX

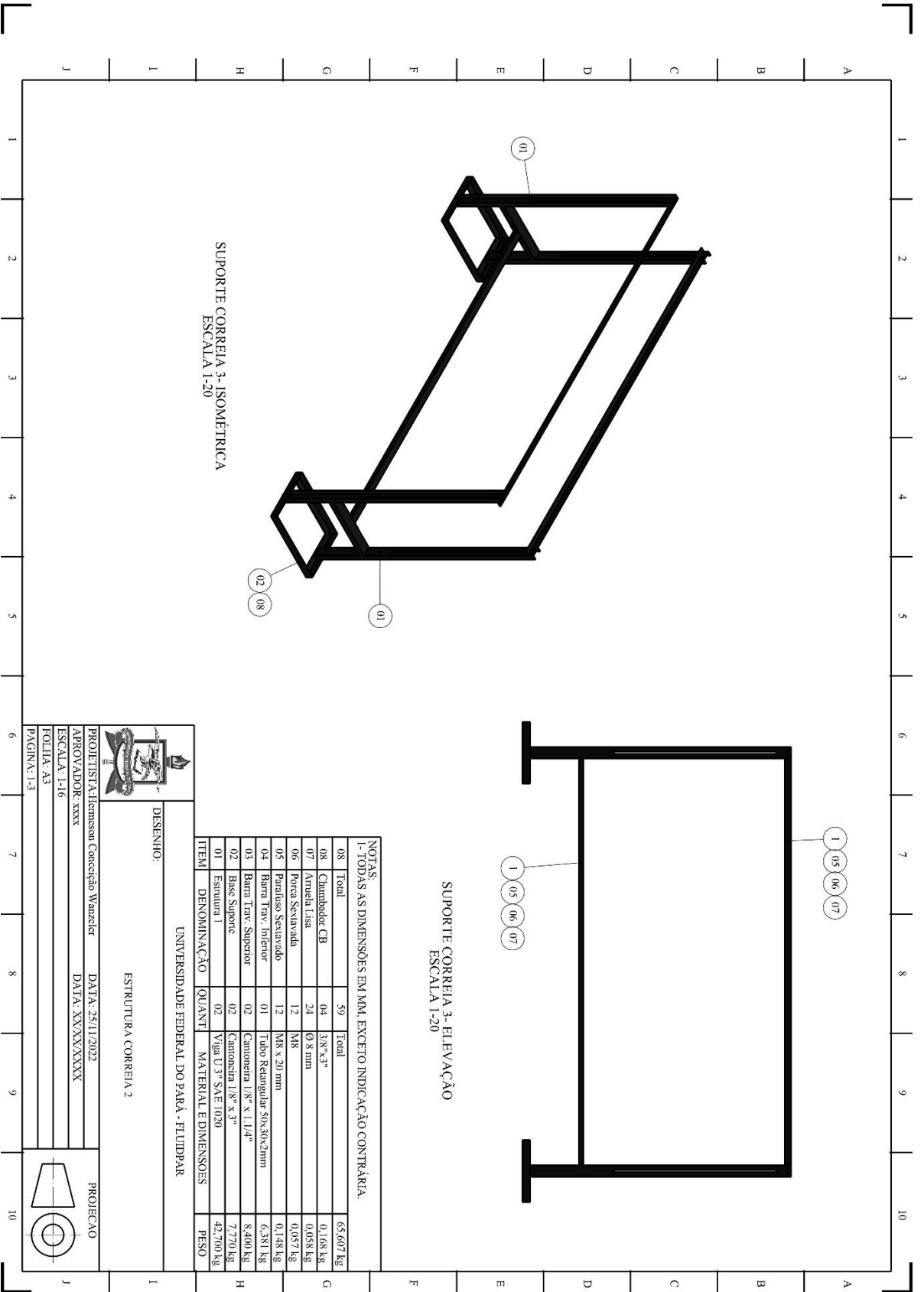
ESCALA: 1:30

FOLHA: A3

PÁGINA: 1-1

PROJEÇÃO

APÊNDICE D – PROJETO DO SUPORTE DO CHUTE



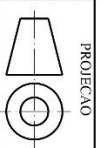
NOTAS:
1- TODAS AS DIMENSÕES EM MM, EXCETO INDICAÇÃO CONTRÁRIA.

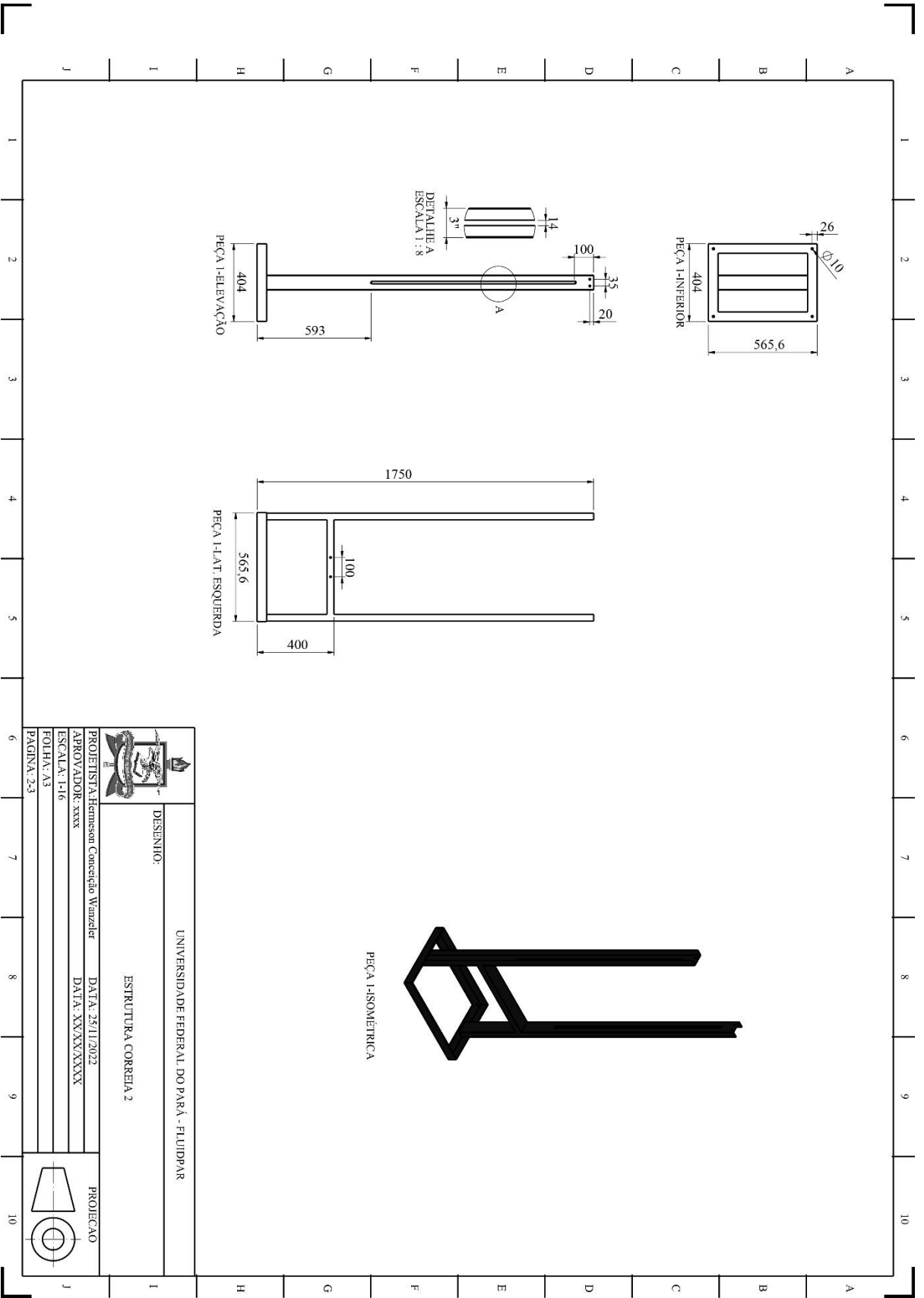
08	Total	59	Total	65,607 Kg
08	Chumbador CB	04	3,8" x 3"	0,168 kg
07	Arrieta Lisa	24	Ø 8 mm	0,058 kg
06	Porca Sextavada	12	N/A	0,057 kg
05	Parafuso Sextavado	12	N/A x 20 mm	0,148 kg
04	Barra Trav. Inferior	01	Tubo Retangular 50x30x2mm	6,381 kg
03	Barra Trav. Superior	02	Canoneira 1/8" x 1/4"	8,400 kg
02	Base Supporte	02	Canoneira 1/8" x 3/8"	7,770 kg
01	Estrutura 1	02	Viga U 3" SAE 1020	42,700 kg
ITEM	DENOMINAÇÃO	QUANT	MATERIAL E DIMENSÕES	PESO

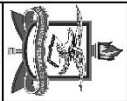

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - FLUIDPAR

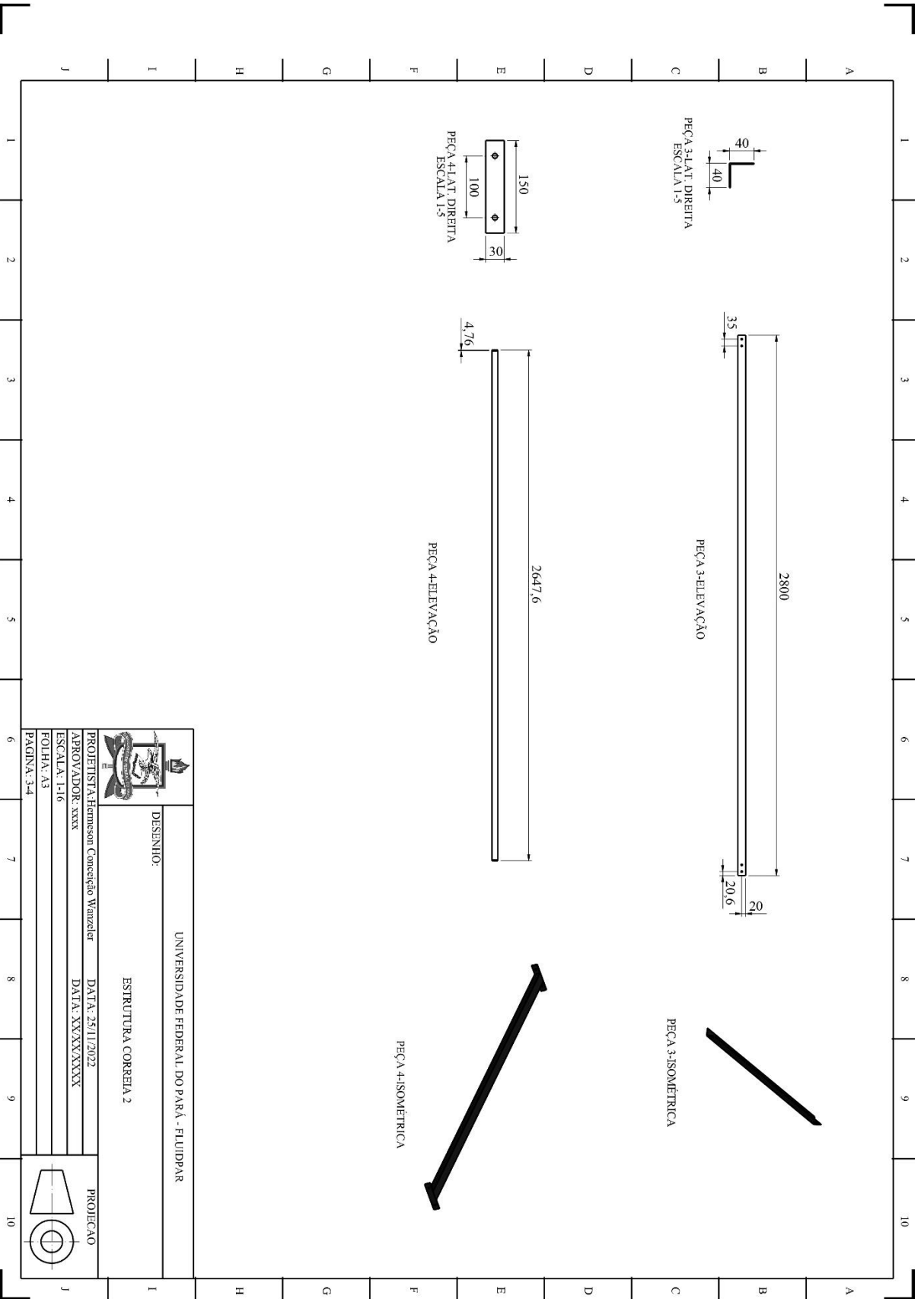
DESENHO:
ESTRUTURA CORREIA 2

	PROJETISTA: Heimonson Conceição Wanzler	DATA: 25/11/2022	PROJEÇÃO
	APROVADOR: xxxx	DATA: XX/XX/XXXX	
	ESCALA: 1-16		
	FOLHA: A3		
	PÁGINA: 1-3		

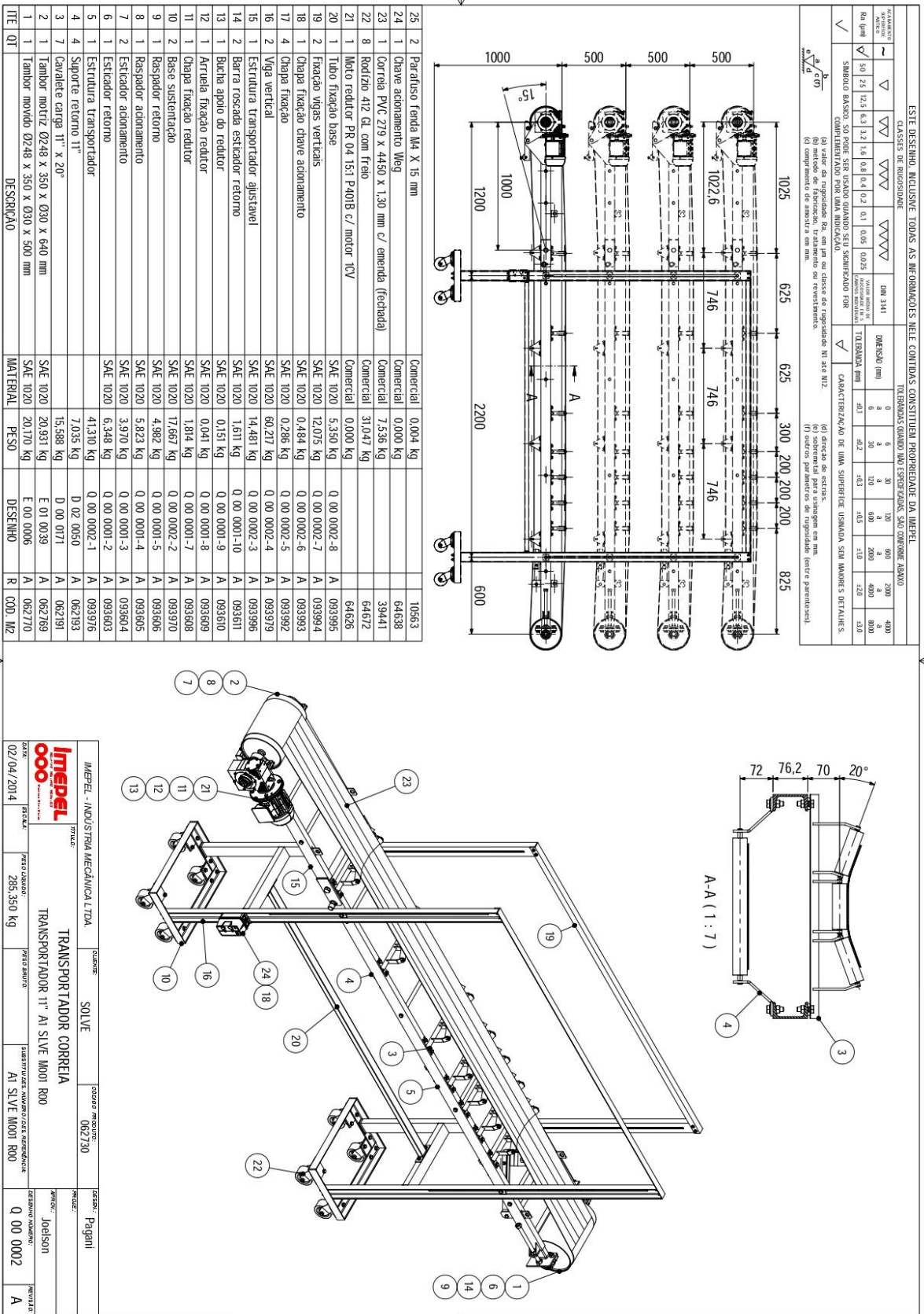




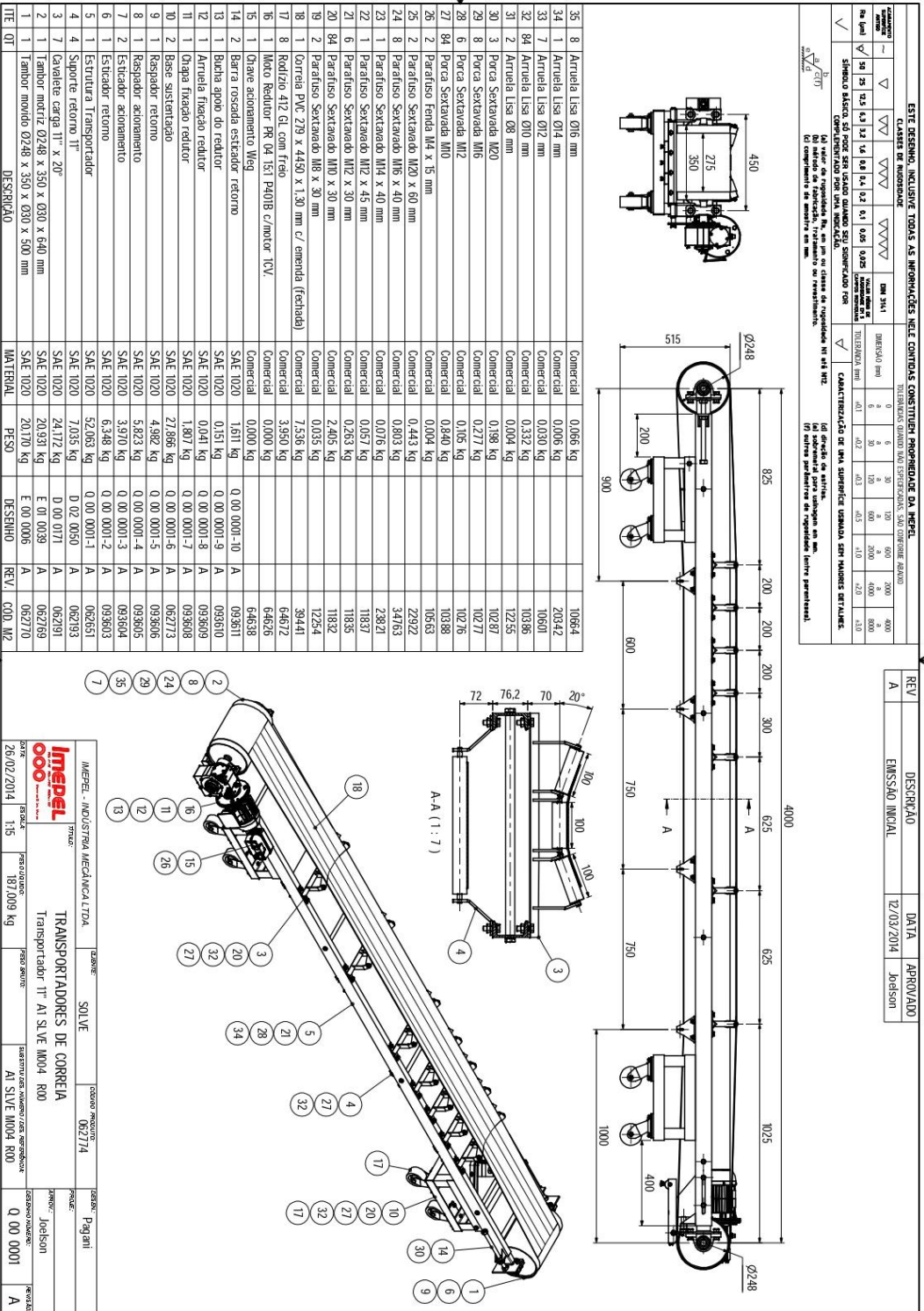
		UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - FLUPAR	
DESENHO:		ESTRUTURA CORREIA 2	
PROJETISTA: Hermeson Conceição Wanzel		DATA: 25/11/2022	
APROVADOR: xxxx		DATA: XXXXX/XXXX	
ESCALA: 1-16			
FOLHA: A3			
PÁGINA: 23			
PROJEÇÃO			



ANEXO A – TRANSPORTADOR DE CORREIA SUPERIOR



ANEXO B – TRANSPORTADOR DE CORREIA INFERIOR



REV	DESCRIÇÃO	DATA	APROVADO
A	EMISSÃO INICIAL	12/03/2014	Joelson

IMPEL - INDUSTRIAL MECÂNICA LTDA	SOLVE	06/27/14	Paqani
TRANSPORTADORES DE CORREIA			
Transportador 11" AT SLIVE M004 R00			
26/02/2014	115	187.009 kg	0,00 0001