

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISCO PELOTIZADOR  
EM ESCALA LABORATORIAL UTILIZANDO  
CONTROLE EM MALHA ABERTA**

**ELOISA ANGÉLICA SILVA GARCIA**

**Catalão - GO**

**2019**

---

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR  
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES  
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico:       Dissertação       Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

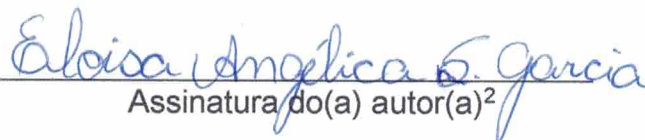
Nome completo do autor: Eloisa Angélica Silva Garcia

Título do trabalho: Desenvolvimento de um disco pelletizador em escala laboratorial utilizando controle em malha aberta

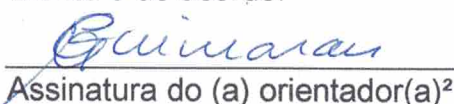
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento  SIM       NÃO<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

  
Assinatura do(a) autor(a)<sup>2</sup>

Ciente e de acordo:

  
Assinatura do (a) orientador(a)<sup>2</sup>

Data: 17 / 10 / 2019

---

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

<sup>2</sup> A assinatura deve ser escaneada.

# **DESENVOLVIMENTO DE UM DISCO PELOTIZADOR EM ESCALA LABORATORIAL UTILIZANDO CONTROLE EM MALHA ABERTA**

**ELOISA ANGÉLICA SILVA GARCIA**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Goiás como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**.

Área de Concentração: Engenharia de Operações e Processos Industriais.

**Orientador:** Prof. Dr. Marco Paulo Guimarães

**Catalão – GO**  
**2019**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Silva Garcia, Eloisa Angélica

Desenvolvimento de um disco pelletizador em escala laboratorial  
utilizando controle em malha aberta [manuscrito] / Eloisa Angélica  
Silva Garcia. - 2019.

100 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Marco Paulo Guimarães.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, , Catalão,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Catalão, 2019.  
Bibliografia. Apêndice.

Inclui fotografias, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Pelotização. 2. Disco pelletizador. 3. Automação. 4. Calcário. I.  
Guimarães, Marco Paulo , orient. II. Título.

CDU 658.5



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE ENGENHARIA

### ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **012** da sessão de Defesa de Dissertação de **ELOISA ANGÉLICA SILVA GARCIA**, que confere o título de Mestra em **ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, na área de concentração em **ENGENHARIA DE OPERAÇÕES E PROCESSOS INDUSTRIAIS**.

Aos **dezenove dias do mês de setembro do ano de dois mil e dezenove**, a partir das **10 horas**, na **sala do mestrado em Engenharia de Produção da Unidade Acadêmica Especial de Engenharia**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **“DESENVOLVIMENTO DE UM DISCO PELOTIZADOR EM ESCALA LABORATORIAL UTILIZANDO CONTROLE EM MALHA ABERTA”**. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Orientador, Professor Doutor **MARCO PAULO GUIMARÃES (PPGEP)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **NILSON JOSÉ FERNANDES (PPGEP)**, membro titular interno; Professora Doutora **ANDREA CRISTINA DOS SANTOS (PPMEC/UNB)**, membro titular externo, participação via vídeo-conferencia. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido a candidata **aprovada** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **MARCO PAULO GUIMARÃES**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **dezenove dias do mês de setembro de dois mil e dezenove**.

OBS: Segundo o Art. 18 da Norma Interna PPGEP 05/2017: "A obtenção do Título de Mestre será condicionada à incorporação, no Trabalho de Conclusão do Mestrado, modalidade dissertação, das possíveis correções e sugestões de alterações feitas pela Banca Examinadora durante a Defesa". Ainda, o Art. 19 reza que: "O aluno deverá entregar a versão final do seu Trabalho de Conclusão do Mestrado, modalidade dissertação, à Secretaria do Programa, no formato digital e impresso (se solicitado pelo orientador), no prazo máximo de 30 (trinta) dias, após a data da Defesa. ... §2º O aluno que não entregar tais documentos dentro do prazo previsto junto à secretaria do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção não terá encaminhada a solicitação de diploma". Sendo assim, as correções indicadas deverão ser incorporadas ao texto.

#### TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Título original mantido



Documento assinado eletronicamente por **Marco Paulo Guimarães, Chefe**, em 19/09/2019, às 18:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andrea Cristina dos Santos, Usuário Externo**, em 23/09/2019, às 11:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Nilson José Fernandes, Professor do Magistério Superior**, em 24/09/2019, às 17:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0888005** e o código CRC **28D3AEA0**.

---

**Referência:** Processo nº 23070.032727/2019-46

SEI nº 0888005

*À minha família pelo amor,  
carinho, compreensão e apoio  
constantemente.*

*Aos amigos, pelo suporte  
oferecido em um período de  
tantas lutas e desafios.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus pelas oportunidades, pela força, saúde, proteção, conforto, perseverança e incontáveis graças recebidas ao longo de toda a vida.

Agradeço ao professor Marco Paulo Guimarães, pela paciência, dedicação, disponibilidade e orientação em todos os aspectos relacionados ao desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos professores André Alves de Resende, Andrea Cristina dos Santos e Nilson José Fernandes, membros das bancas examinadoras, pela disponibilidade, gentileza e contribuições com correções, sugestões e ajustes, aperfeiçoando este trabalho.

Especialmente a Iago Ferreira Lima, pela solicitude, incentivo e pelo tempo dedicado ao desenvolvimento das atividades deste trabalho. Também a Lucas Vale Costa, Lucas Fagundes Vaz, Sérgio Henrique Fernandes Mundim e a todos os demais técnicos e alunos atuantes junto à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, pelo companheirismo e toda ajuda fornecida.

À escola SENAI de Catalão pelo apoio em procedimentos laboratoriais complementares e pela minha liberação em algumas demandas no horário de trabalho.

Agradeço imensamente aos meus grandes amigos Victor Hugo Oliveira, Aline Alvarenga, Flávia Resende, Luiza Alves, Paula Gomes e Thalita Oliveira pelo companheirismo e apoio em momentos tão difíceis.

Finalmente, reconheço e sou extremamente grata por toda ajuda recebida de meus amigos, de meu pai e irmãos, em especial de minha mãe Maria de Lourdes, que me apoia e está sempre comigo.

*“Amigo, nunca te esqueças: sofrendo provas e ultrajes, não importa o que padeças importa como reages”.*

*Chico Xavier*

GARCIA, E. A. S. **Desenvolvimento de um disco pelletizador em escala laboratorial utilizando controle em malha aberta.** 100 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Catalão, GO. 2019.

## RESUMO

A pelletização foi criada com a finalidade do aproveitamento de minérios com granulometria inferior a 0,15 mm, obtendo-se os aglomerados pelo rolamento do material em tambores ou discos. Neste trabalho buscou-se desenvolver um equipamento automatizado para pelletização de minérios, em escala laboratorial, com o controle em malha aberta da inclinação, da velocidade angular do equipamento e da quantidade de água adicionada ao material, gerando um produto de acordo com o tamanho selecionado no painel da máquina. Todos os ensaios foram realizados durante trinta minutos, em batelada, com cinco quilogramas de material, adotando o calcário como mineral teste. As pelotas cruas foram caracterizadas em termos de tamanho por meio de ensaios de peneiramento vibratório em bancada. Inicialmente, as grandezas foram variadas manualmente para inferir o efeito das mesmas nas dimensões do produto gerado. Em seguida foram selecionados os parâmetros adequados para a geração de um produto pequeno, médio e grande, conforme a menor variabilidade obtida nos testes. Posteriormente, esses parâmetros foram utilizados em uma programação para CLP em malha aberta, controlando automaticamente os parâmetros inclinação, velocidade angular e quantidade de água alimentada na aglomeração, de acordo com o tamanho selecionado pelo operador. Os testes finais foram realizados com o equipamento automatizado confirmando a eficiência do controle em malha aberta na geração dos três tamanhos de produto, afirmada pela aproximação do  $d_{50}$  de cada teste, antes e depois da automação.

**Palavras-chave:** pelletização, disco pelletizador, automação, calcário.

GARCIA, E. A. S. **Development of a laboratory scale pelletizing disc using open loop control.** 100 p. Masters Dissertation. Federal University of Goiás, Catalão, GO. 2019.

## **ABSTRACT**

Pelletizing was created with the purpose of using ores with particle size less than 0.15 mm, obtaining the agglomerates by rolling the material in drums or discs. This work aimed to develop an automated ore pelletizing equipment, in laboratory scale, with open loop control of the inclination, the angular velocity of the equipment and the amount of water added to the material, generating a product according to the selected size on the machine panel. All tests were performed for thirty minutes, in batch, with five kilograms of material, using limestone as the test mineral. The raw pellets were characterized in size by bench top vibratory screening assays. Initially, the quantities were manually varied to infer their effect on the dimensions of the generated product. Then the appropriate parameters were selected for the generation of a small, medium and large product, according to the smallest variability obtained in the tests. These parameters were later used in open-loop PLC programming, automatically controlling the inclination, angular velocity, and amount of water fed to the agglomeration parameters according to the size selected by the operator. The final tests were performed with automated equipment confirming the efficiency of open loop control in the generation of the three product sizes, affirmed by the approximation of the  $d_{50}$  of each test before and after automation.

**Key words:** pelletizing, disc pelletizer, automation, limestone.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sínter.....	20
Figura 2 - Briquetes de minério de ferro.....	20
Figura 3 - Pelotas de minério de ferro.....	21
Figura 4 - A) Tambores e B) discos utilizados na pelotização.....	22
Figura 5 - Estágios de formação das pelotas.....	23
Figura 6 - Disco de pelotização.....	24
Figura 7 - Trajetória das partículas no disco pelotizador.....	25
Figura 8 - Disco de pelotização em escala laboratorial.....	26
Figura 9 - Misturador para pelotização.....	27
Figura 10 - Pelotização de calcário em disco.....	28
Figura 11 - Controle em malha aberta.....	29
Figura 12 - Controle em malha fechada.....	30
Figura 13 - Partes constituintes de um motor de indução.....	32
Figura 14 - Relação entre corrente, torque e velocidade de rotação do motor.....	33
Figura 15 - Componentes de um inversor de frequência.....	35
Figura 16 - Configuração das chaves no inversor.....	35
Figura 17 - Esquema de um atuador linear.....	36
Figura 18 - Pelotizador desenvolvido (vista frontal).....	38
Figura 19 - Pelotizador desenvolvido (vista lateral).....	39
Figura 20 - Sistema motor do equipamento.....	39
Figura 21 - Inversor de frequência utilizado.....	40
Figura 22 - Interface do inclinômetro.....	41
Figura 23 - Atuador linear utilizado no trabalho.....	41
Figura 24 - Válvula utilizada.....	42
Figura 25 - Spray aspersor utilizado.....	43
Figura 26 - Empilhamento tipo <i>windrow</i> para homogeneização do calcário.....	43
Figura 27 - A) Quarteamento da matéria prima B) Amostra quarteada.....	44
Figura 28 - Resultado da análise granulométrica.....	46
Figura 29 - Material retido em cada peneira.....	46
Figura 30 - Quarteamento do material.....	47
Figura 31 - Agitador de peneiras utilizado na classificação granulométrica do produto.....	48
Figura 32 - Vista frontal do painel do equipamento.....	50

Figura 33 - Componentes do painel .....	51
Figura 34 - Fluxograma do teste de pelotização .....	52
Figura 35 - Análise granulométrica do produto do teste 1 .....	54
Figura 36 - Comparação entre a análise granulométrica da alimentação e a média do produto do teste 1 .....	55
Figura 37 - Produto do teste 1 .....	55
Figura 38 - Análise granulométrica do produto do teste 2 .....	56
Figura 39 - Comparação entre a análise granulométrica da alimentação e a média do produto do teste 2.....	57
Figura 40 - Produto do teste 2 .....	57
Figura 41 - Análise granulométrica do produto do teste 3 .....	58
Figura 42 - Comparação entre a análise granulométrica da alimentação e a média do produto do teste 3.....	59
Figura 43 - Produto do teste 3 .....	59
Figura 44 - Análise granulométrica do produto do teste 4 .....	60
Figura 45 - Comparação entre a análise granulométrica da alimentação e a média do produto do teste 4.....	61
Figura 46 - Produto do teste 4 .....	61
Figura 47 - Análise granulométrica do produto do teste 5 .....	62
Figura 48 - Comparação entre a análise granulométrica da alimentação e a média do produto do teste 5.....	63
Figura 49 - Produto do teste 5 .....	63
Figura 50 - Análise granulométrica do produto do teste 6 .....	64
Figura 51 - Comparação entre a análise granulométrica da alimentação e a média do produto do teste 6.....	65
Figura 52 - Produto do teste 6 .....	65
Figura 53 - Análise granulométrica do produto do teste 7 .....	66
Figura 54 - Comparação entre a análise granulométrica da alimentação e a média do produto do teste 7.....	67
Figura 55 - Produto do teste 7 .....	67
Figura 56 - Análise granulométrica do produto do teste 8 .....	68
Figura 57 - Comparação entre a análise granulométrica da alimentação e a média do produto do teste 8.....	69
Figura 58 - Produto do teste 8 .....	69
Figura 59 - Análise granulométrica do produto pequeno com ajuste automatizado dos parâmetros .....	72
Figura 60 - Distribuição granulométrica do produto pequeno .....	73

Figura 61 - Comparação da análise granulométrica do produto pequeno antes e depois da automação do equipamento.....	73
Figura 62 - Análise granulométrica do produto médio com ajuste automatizado dos parâmetros .....	74
Figura 63 - Distribuição granulométrica do produto médio .....	74
Figura 64 - Comparação da análise granulométrica do produto médio antes e depois da automação do equipamento.....	75
Figura 65 - Análise granulométrica do produto grande.....	76
Figura 66 - Distribuição granulométrica do produto grande.....	76
Figura 67 - Comparação da análise granulométrica do produto grande antes e depois da automação do equipamento.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do calcário utilizado .....	44
Tabela 2 - Resultados dos ensaios de picnometria .....	45
Tabela 3 - Planejamento experimental.....	49
Tabela 4 - Resultados obtidos com o ajuste manual dos parâmetros .....	70
Tabela 5 - Parâmetros selecionados para a programação .....	71
Tabela 6 - Comparativo entre os resultados obtidos com o ajuste manual e automatizado dos parâmetros de pelotização .....	77

# SUMÁRIO

## CAPÍTULO 1

<b>APRESENTAÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1 Objetivo geral .....	18
1.2 Objetivos específicos.....	18

## CAPÍTULO 2

<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
2.1 Pelotização.....	19
2.1.1 <i>Etapas da pelotização</i> .....	22
2.1.2 <i>Pelotização em disco</i> .....	24
2.1.3 <i>Pelotização de Calcário</i> .....	26
2.2 Automação Industrial.....	28
2.2.1 <i>Sistemas de Controle</i> .....	29
2.2.2 <i>Motor de Indução</i> .....	31
2.2.3 <i>Inversores de Frequência</i> .....	34
2.2.4 <i>Atuador Linear</i> .....	36

## CAPÍTULO 3

<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>37</b>
3.1 Materiais.....	37
3.1.1 <i>O Equipamento</i> .....	37
3.1.2 <i>Caracterização da matéria-prima</i> .....	43
3.2 Métodos .....	47
3.2.1 <i>Caracterização do produto</i> .....	47
3.2.2 <i>Planejamento experimental</i> .....	49
3.2.3 <i>Programação do equipamento</i> .....	50

## CAPÍTULO 4

<b>RESULTADOS OBTIDOS COM O AJUSTE MANUAL DE PARÂMETROS</b> .....	<b>54</b>
4.1 Teste 1 .....	54
4.2 Teste 2 .....	56
4.3 Teste 3 .....	58
4.4 Teste 4 .....	60
4.5 Teste 5 .....	62
4.6 Teste 6 .....	64

4.7 Teste 7 .....	66
4.8 Teste 8 .....	68
4.9 Testes finais .....	70
<b>CAPÍTULO 5</b>	
<b>RESULTADOS OBTIDOS COM O AJUSTE AUTOMATIZADO DOS PARÂMETROS .....</b>	<b>72</b>
<b>CAPÍTULO 6</b>	
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>78</b>
6.1 Considerações finais .....	78
6.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	79
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>80</b>
<b>APÊNDICE A</b>	
<b>Programação desenvolvida .....</b>	<b>84</b>
<b>APÊNDICE B</b>	
<b>Repetições dos testes com o ajuste manual dos parâmetros de aglomeração .....</b>	<b>88</b>
<b>APÊNDICE C</b>	
<b>Resultados dos testes com ajuste automatizado dos parâmetros de aglomeração ....</b>	<b>97</b>

## **CAPÍTULO 1**

### **APRESENTAÇÃO**

A aglomeração mineral é um processo relativamente recente se comparado à mineração e à metalurgia. Ela surge principalmente para permitir o aproveitamento das frações granulométricas menores que 1,00 mm, especialmente do minério de ferro, já que essas partículas não eram utilizadas na metalurgia em virtude da improdutividade que apresentavam nos fornos (CAMPOS e FONSECA, 2018).

Esse problema foi solucionado com processos de sinterização, briquetagem e pelletização, capazes de entregar um produto coeso, com características adequadas ao transporte e uso posterior se forem submetidos a um tratamento térmico correto. Assim, a pelletização promove com eficiência o aproveitamento das partículas ultrafinas de materiais.

O produto da pelletização é chamado de pelota fazendo alusão ao formato esférico dos aglomerados, conseguido por meio de tambores ou discos quando o material (minério, insumos e água) é rolado nesses equipamentos. No Brasil, os discos são os principais equipamentos utilizados para a produção de pelotas, sendo utilizados em quase todas as plantas de pelletização do país.

O calcário é uma rocha sedimentar de extrema importância no cotidiano da sociedade, tendo uma de suas principais aplicações na correção da acidez do solo. No entanto, devido à aplicação de frações granulométricas extremamente finas, há perdas consideráveis nesse processo. Desta maneira, esse mineral é passível de aglomeração, conforme apresentado em vários estudos.

Este trabalho busca desenvolver um dispositivo automatizado para pelletização de minérios, em escala laboratorial, com controle em malha aberta, demonstrando a viabilidade da aplicação deste tipo de controle no processo citado. O equipamento foi testado com o calcário, a partir do controle da inclinação, da velocidade angular e da quantidade de água alimentada. Assim, é verificada a interferência desses parâmetros no tamanho das pelotas

produzidas de forma a gerar uma programação em CLP para atender a geração dos aglomerados, conforme a classificação granulométrica pequena, média ou grande.

A construção deste equipamento proporcionará o desenvolvimento da pelotização de minérios, colaborando com o aumento da produtividade do processo bem como com o aproveitamento da parcela mineral ultrafina.

## **1.1 Objetivo geral**

O objetivo deste trabalho é possibilitar melhorias e um ganho de produtividade na aglomeração mineral por meio da utilização do controle em malha aberta em um disco pelotizador automatizado em escala laboratorial. Para isso, testou-se o equipamento com calcário, controlando a inclinação, a velocidade angular do disco e a quantidade de água, bastando ao operador selecionar o tamanho dos aglomerados desejados. Isso permite colaborar com o aumento da produtividade do processo de pelotização.

## **1.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos consistem em:

- Construir e automatizar um dispositivo eletromecânico para pelotização, comparando o custo de desenvolvimento a outros pelotizadores disponíveis no mercado;
- Verificar a tendência de comportamento do tamanho dos aglomerados conforme as variações da inclinação, velocidade angular e quantidade de água adicionada.
- Controlar a inclinação, a velocidade angular e a quantidade de água alimentada;
- Testar o equipamento com o mineral calcário;
- Avaliar o tamanho dos aglomerados produzidos;
- Verificar a viabilidade da utilização do controle em malha aberta no processo de pelotização.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir são apresentados os principais conceitos relacionados ao tema deste trabalho, bem como o contexto em que o mesmo se insere. Será apresentada a revisão da literatura no que tange aos o processo de pelotização, a pelotização em disco e pelotização de calcário, além de aspectos da automação industrial.

#### 2.1 Pelotização

A geração de alguma fração granulométrica de material fino nas operações de lavra, transporte, beneficiamento mineral, etc., é inevitável dentro da indústria de mineração. Essa fração granulométrica inferior às dimensões requisitadas, no entanto, não possui viabilidade de aplicação direta em muitos processos industriais – metalúrgicos e siderúrgicos por exemplo. Desta maneira, estas são descartadas ou não recuperadas, e acumuladas em pátios e barragens (GARCIA et al, 2015).

Nesse contexto, surge a aglomeração mineral: operações capazes de agregar as partículas finas (inferiores a 1,0 mm) de forma que estas se tornem corpos com tamanho e resistência mecânica adequados ao uso posterior. Esse conceito foi aplicado primeiramente aos finos de minério de ferro, cuja utilização em equipamentos siderúrgicos de larga escala era inviável. Assim, são gerados no processo os seguintes produtos (USIMINAS, 2018):

- Granulados – Tamanho superior a 6,3 mm e podem ser utilizados diretamente nos fornos;
- *Sinterfeed* – fração granulométrica entre 0,15 e 6,3 mm;
- *Pelletfeed* – partículas com tamanho inferior a 0,15 mm.

Os primeiros processos desenvolvidos dentro da aglomeração foram a briquetagem e a sinterização. Este último possibilitou o reaproveitamento da fração com tamanho entre 6,3 mm e 0,15 mm. A Figura 1 a seguir apresenta o sinter, produto da sinterização.



Figura 1 - Sínter  
Fonte: DK (2017).

A Figura 2 ilustra o briquete de minério de ferro, originado no processo de briquetagem.



Figura 2 - Briquetes de minério de ferro  
Fonte: Portal Fator Brasil (2011).

Entretanto, a parcela com granulometria menor que 0,15 mm foi considerada inadequada à sinterização, por diminuir a permeabilidade dos gases nos fornos. Além disso, gera grande quantidade de poeira devido às suas pequenas dimensões.

Para o aproveitamento desse material, surgiu a pelotização no início do século XX, que segundo Martins (2007) é um dos processos de aglomeração mais importantes adotado pelas companhias. Esse processo baseia-se no rolamento de uma mistura úmida de minério e aditivos (aglomerantes, óxidos básicos, carvão mineral, entre outros) em disco ou tambor, resultando em um aglomerado esférico com diâmetro entre 6,3 e 16 mm (SILVEIRA, 2014).

O tratamento térmico da pelota é primordial para que ela adquira resistência mecânica ao manuseio além de propriedades metalúrgicas superiores, tornando-se capaz de atender os requisitos do processo de redução. Pelotas de minério de ferro são apresentadas na Figura 3.



Figura 3 - Pelotas de minério de ferro  
Fonte: Exame (2018).

Os primeiros registros da pelotização surgiram com o pedido de patentes pelo o inventor A. G. Anderson em 1912 na Suécia, seguido pelos estudos de C. A. Brackelsberg na Alemanha em 1913, onde também foi construída a primeira planta piloto em 1926. Com a descoberta de seu potencial de agregação de valor, esse processo passa a ter maior importância depois de 1940 (CAMPOS e FONSECA, 2018).

Segundo Moraes (2014), em 1950 a pelotização estava consolidada e sendo realizada comercialmente na Suécia, e já em 1955 entra em funcionamento nos Estados Unidos uma usina com capacidade de produção de seis milhões de toneladas por ano. No Brasil, o processo inicia-se em 1961, resultado de um convênio entre a Companhia Vale do Rio Doce e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

Os principais equipamentos que realizam a pelletização são os discos e tambores. Os mesmos são ilustrados na Figura 4 à seguir.

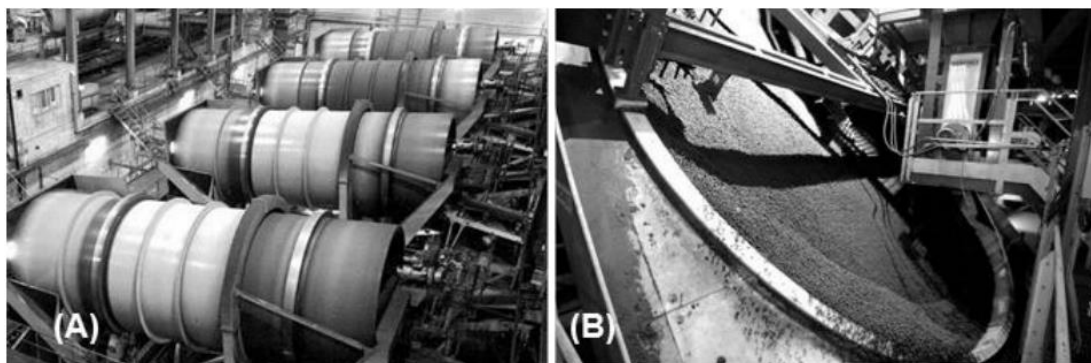


Figura 4 - A) Tambores e B) discos utilizados na pelletização  
Fonte: Campos e Fonseca (2018).

Segundo Augusto (2012), a pelletização pode ser feita por tambores ou discos, sendo esses últimos os mais utilizados. No Brasil, apenas uma planta de pelletização, na cidade de Congonhas – MG, produz pelotas por meio de tambores.

Mourão (2017) e a fabricante de equipamentos em mineração Metso (2018) afirmam que nos discos há menor taxa de recirculação (as pelotas são produzidas no intervalo de tamanho adequado, evitando-se o reprocessamento), além destes apresentarem menores dimensões, menor necessidade de utilização de peneiras de classificação na saída do equipamento e funcionamento mais simples se comparados aos tambores.

### 2.1.1 Etapas da pelletização

Segundo Mourão (2017) ocorrem basicamente três etapas no processo de pelletização. São elas: preparação da matéria prima, pelletamento e queima. A etapa de queima não será detalhada aqui por não fazer parte do objetivo do trabalho.

A primeira etapa é a preparação da matéria prima, quando alguns insumos serão adicionados em proporções adequadas à fração fina de minério (chamada *pellet feed*), com a função de garantir aos aglomerados as características físicas, químicas e metalúrgicas requeridas nos processos subsequentes. Segundo Martins (2007), a utilização de aglomerantes é adotada nos Estados Unidos desde o início da pelletização, no intuito de melhorar a qualidade das pelotas e a bentonita está entre os melhores aglomerantes disponíveis.

Na etapa seguinte ocorre a formação das pelotas cruas pelo rolamento da mistura no equipamento de pelletização. Conforme Martins (2007), entre todas as etapas de produção das pelotas, a formação dos aglomerados no equipamento é a etapa mais difícil de ser controlada. Isso ocorre porque as características relacionadas à forma e ao tamanho são variáveis, interferindo na quantidade de água necessária na etapa de pelletamento.

O teor de água inserido para a produção das pelotas depende do material a ser pelletizado e a água é fundamental no processo, atuando por dois mecanismos distintos e consecutivos: sua adsorção pela superfície das partículas e a umidade capilar retida pelo contato entre elas. Martins (2007) reconhece a quantidade de água como a variável mais importante nesse estágio, pois afeta diretamente a qualidade das pelotas cruas produzidas.

A etapa de pelletamento inicia-se com o rolamento da mistura no equipamento aglomerador, onde o contato entre as partículas envolvidas por uma camada de água leva à união das mesmas. Nesse processo estão envolvidas forças capilares e de tensão superficial sendo que a adição de água adensa o aglomerado gerado pelo preenchimento dos interstícios. Essa etapa encerra-se com o recobrimento da pelota por água, como ilustra a Figura 5.

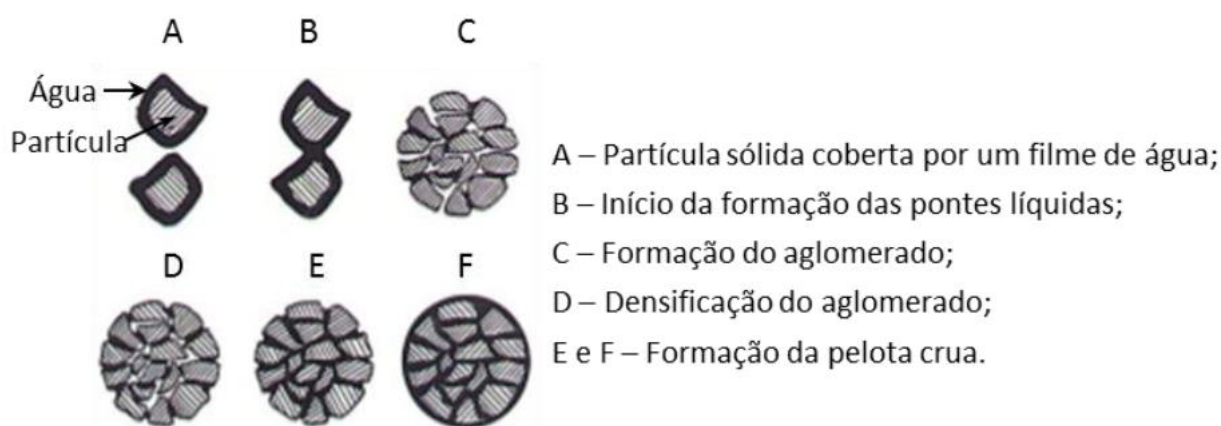


Figura 5 - Estágios de formação das pelotas  
Fonte: Campos e Fonseca (2018).

Segundo Moraes (2014), o crescimento das pelotas deve ocorrer de forma adequada para que não se percam as propriedades requeridas nos produtos. Por exemplo, um crescimento exagerado e rápido dos aglomerados pode ocasionar distorções na forma, alta porosidade e baixa resistência dos mesmos.

Diversas variáveis interferem na formação das pelotas, entre elas citam-se a quantidade de água utilizada, parâmetros operacionais (inclinação, rotação, entre outros) e distribuição de tamanho das partículas do material alimentado (FONSECA, 2004).

Augusto (2012) sugere ainda como fatores determinantes nesse processo a ação de forças físicas (forças de Van der Waals, magnéticas e eletrostáticas, por exemplo), área da superfície da pelota, formato e estrutura cristalina das partículas; presença de forças capilares e tensões superficiais devido à presença de água. Fonseca (2004), acrescenta ainda como fatores importantes para a formação das pelotas cruas, o tipo e quantidade de aglomerantes e a mineralogia envolvida.

Concluído o estágio de pelotamento, os aglomerados são descarregados do equipamento e podem ser imediatamente distribuídos uniformemente em mesas de rolos para sua classificação. Conforme Campos e Fonseca (2018), a classificação do produto possibilita que sejam rejeitadas as pelotas com tamanho superior e inferior ao desejado, sendo estas posteriormente destruídas e realimentadas nos equipamentos pelotizadores.

### 2.1.2 Pelotização em disco

Como já foi dito, os discos e os tambores são os principais equipamentos de pelotização. Segundo Moraes (2014), inicialmente, a maior parte das pelotas para comercialização era produzida por tambores e somente com o avanço da tecnologia os discos foram desenvolvidos. Atualmente ambos os equipamentos ainda são utilizados.

Maia (2011) afirma que normalmente o disco é preferido em virtude de seu fácil manuseio operando praticamente sem carga circulante, ou seja, todo o material alimentado sai do equipamento rapidamente na forma de pelotas (carga alimentada é igual à carga descarregada). Além disso, proporciona resultados satisfatórios em um tempo menor que nos tambores. A Figura 6 apresenta um disco de pelotização.



Figura 6 - Disco de pelotização  
Fonte: Rogesesi (2017).

Os discos consistem de uma base circular com bordas de altura determinada que gira de forma inclinada, enquanto se alimenta o equipamento com a mistura. A Figura 7 a seguir, apresenta a trajetória realizada pelas partículas no equipamento.

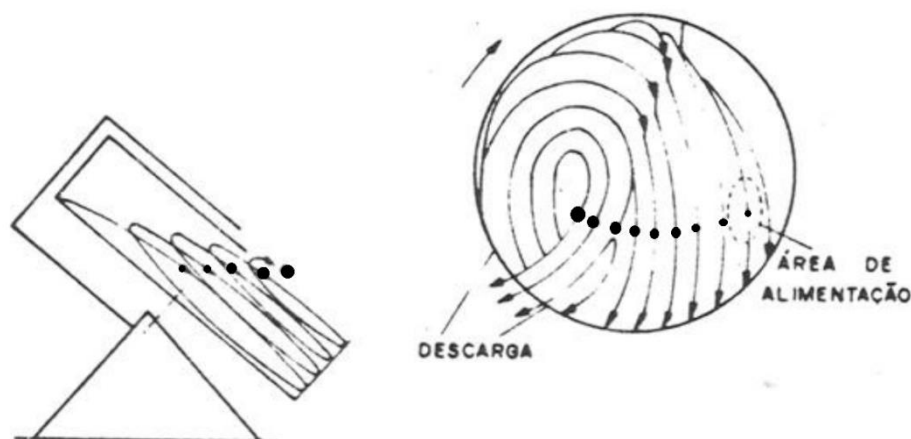


Figura 7 - Trajetória das partículas no disco pelotizador  
Fonte: Adaptado de USP (20--).

As dimensões dos discos são variáveis conforme a escala de produção. Moraes (2014) afirma que o diâmetro do equipamento é aproximadamente quatro vezes maior que a parede do mesmo (profundidade da “panela”) e a inclinação adotada é da ordem de 45°, segundo o autor.

Em algumas empresas, por exemplo, a pelotização se dá por meio de discos com velocidade angular entre 5 e 7,6 rpm, inclinação entre 45 e 48° e diâmetro de 7,5 m, resultando em uma capacidade de produção de 150 t/h (FONSECA, 2004). Em escala piloto, podem ser utilizadas com sucesso as dimensões de 1 m de diâmetro, profundidade da “panela” de 0,2 m, inclinação entre 45 a 50° e rotação no intervalo de 10 a 20 rpm.

Maia (2011) utiliza em seus estudos um disco com diâmetro de 1,0 m, velocidade de rotação de 15,6 rpm, ângulo de inclinação de 49,90° por um tempo aproximado de pelotamento de 35 minutos. Já Moraes (2014), adota em seu trabalho os seguintes parâmetros: alimentação em bateladas de 5 kg de material, diâmetro do disco de 1,2 m, velocidade angular de 17 rpm e inclinação de 45°.

A empresa fabricante Engendrar fornece discos de diâmetro de 0,4 ou 0,6 m, com inclinação de até 60° com a vertical e a rotação pode ser escolhida entre zero e 100 rpm. Já a fabricante Brastorno oferece discos com diâmetro de 0,3 ou 0,6 m, rotação regulável também entre zero e 100 rpm, dotados de mangueira de alimentação de água.

A Figura 8 a seguir, apresenta um disco pelotizador em escala laboratorial.



Figura 8 - Disco de pelotização em escala laboratorial  
Fonte: Brastorno, 2017.

Em processo contínuo, Fonseca (2004) sugere que a força centrífuga e o peso das pelotas atuam no descarregamento das mesmas na saída do equipamento - sendo um autoclassificador dos aglomerados. Além disso, é comum a utilização de mesas de rolos classificadores para auxiliar a separação do produto dentro da faixa granulométrica requerida. O produto fora das especificações é desagregado e volta ao silo de pelotamento para ser aglomerado dentro do intervalo de tamanho adequado.

Ainda segundo o autor, neste caso, o tempo de residência do material no equipamento é uma das principais variáveis a ser controlada no caso do disco pelotizador, que depende especialmente da taxa de alimentação, velocidade angular (rpm), inclinação e de características específicas do equipamento. É importante ressaltar que o disco deve trabalhar em perfeitas condições operacionais, evitando-se a oscilação desses parâmetros e garantindo a estabilidade requerida às variáveis do processo.

Moraes (2014) afirma ainda que altas rotações diminuem o tempo para as pelotas atingirem o tamanho requerido e a inclinação exercerá influência na quantidade de pelotas geradas e no tamanho das mesmas. A carga e a quantidade devem interferir principalmente no tamanho das pelotas.

### *2.1.3 Pelotização de Calcário*

O calcário é mais comumente comercializado na forma de pó, embora isso possa acarretar problemas como poeira e difícil controle de aplicação, segundo FEECO

INTERNATIONAL (2018). Assim, a pelotização de calcário provou ser uma solução eficaz para muitos dos problemas apresentados pela forma mais comum de comercialização desse minério. Veverka e Hinkle (2001) afirmam que as pelotas de calcário são rapidamente assimiladas pelo solo, no caso de sua utilização como corretivo agrícola.

O processo se inicia com a trituração do calcário, que pode ser previamente misturado a um ligante químico ou ambos serem alimentados diretamente no pelotizador. O uso de misturadores promove um maior rendimento, diminuindo a quantidade de aglomerante utilizada e produzem mais pelotas dentro do tamanho requerido. Um exemplo de misturador é mostrado na Figura 9.

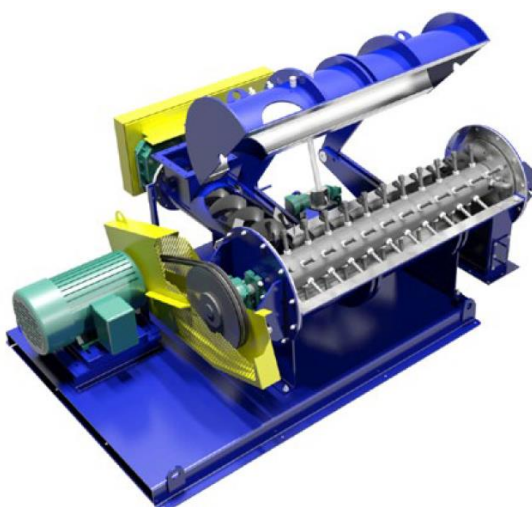


Figura 9 - Misturador para pelotização  
Fonte: FEECO INTERNATIONAL (2018).

Segundo Veverka e Hinkle (2001), o aglomerante (também chamado de aglutinante) é responsável pela ligação das partículas finas, permitindo que as pelotas possam ser manipuladas sem a deterioração das mesmas. Os autores afirmam ainda que o aglutinante é um dos principais fatores que interferem no processo e, com essa finalidade, é comum o uso de substâncias como lignossulfonato, brewex (um tipo de amido modificado) e melação de cana de açúcar.

A aglomeração acontece com o rolamento das partículas de calcário dentro do pelotizador, com a alimentação sendo feita a uma taxa controlada e constante. O rolamento provoca a adesão de mais partículas fazendo com que a pelota cresça sendo descarregadas do equipamento quando atingem o tamanho desejado. Uma vez que o processo requer a presença de água, é comum haver a secagem do material para eliminar a umidade, segundo a FEECO INTERNATIONAL (2018).

Veverka e Hinkle (2001) efetuaram testes de pelletização de calcário em disco adotando uma inclinação de  $54^\circ$ , velocidade de rotação de 20 rpm, com duração de 30 minutos. As pelotas fruto desses ensaios foram caracterizadas em termos da massa específica; da resistência, com testes de queda, compressão, atrito e abrasão; teor de umidade; e em termos de tamanho de partícula e solubilidade. A Figura 10 a seguir ilustra a pelletização de calcário em disco.



Figura 10 - Pelotização de calcário em disco  
Fonte: Veverka e Hinkle (2001).

Garcia et al. (2015) adotou em seu trabalho um teor de umidade de 16% para pelletização manual de calcário.

## 2.2 Automação Industrial

Nos anos 2000, o conceito de automação passava por uma revolução, primeiramente devido à necessidade de compreensão dos diversos tipos de processos, especializando normas e produtos que melhor atendessem os setores de automação em processos contínuos, na automação em batelada e na automação da manufatura. A segunda revolução acontecia devido à abrangência da automação de processos e equipamentos em automação de negócios. O objetivo consistia em implementar ferramentas que possibilitassem maior armazenamento de dados e integração entre diversos sistemas de informação (VALE, 2014).

Já Silveira e Lima (2003) e Goeking (2010) afirmam que o conceito de automação foi ampliado como sendo técnicas que automatizaram as tarefas antes realizadas pela força

muscular e mental humana, fazendo com que as mesmas passassem a ser desempenhadas agora por sistemas de computação e elementos eletromecânicos, tornando os processos mais produtivos, seguros, baratos e eficientes.

Segundo Buccioli, Zorzal e Kirner (2016), os sistemas industriais automatizados são muito precisos e as máquinas muito sincronizadas, envolvendo em sua construção, ciências como Física, Mecânica, Hidráulica e Pneumática.

Com o avanço da automação, dispositivos para medição e controle de diversas variáveis foram desenvolvidos para controlar a grandeza física de interesse e esse controle pode ocorrer em malha aberta ou fechada. A seguir são evidenciados os principais elementos utilizados no desenvolvimento desse trabalho como os sistemas de controle, uma comparação entre o sistema de malha fechada e malha aberta, o motor de indução, o inversor de frequência e o atuador linear.

### 2.2.1 *Sistemas de Controle*

Programar um sistema de controle significa trabalhar com as variáveis de entrada (ou de controle) e saída (ou de estado) do processo. As variáveis de entrada são aquelas cujos parâmetros já foram determinados previamente e a interação entre estas variáveis e o processo gera uma resposta: a variável de estado. Existem duas estratégias para programação de sistemas de controle: em malha aberta (*open-loop control*) e em malha fechada (*closed-loop control*).

No controle em malha aberta, o parâmetro da variável de entrada é selecionado *a priori*, independente da variável de saída que será gerada (BAUMEISTER; LEITÃO, 2008), ou seja, a saída não afeta a ação de controle e segundo Ogata (2010) não há medida ou realimentação do sinal de saída para que o mesmo seja comparado à entrada e reutilizado em um novo ciclo. O esquema simplificado da Figura 11 ilustra o controle em malha aberta.



Figura 11 - Controle em malha aberta  
Fonte: Instrumentação e Controle (2019).

Nos sistemas de controle em malha fechada, a escolha dos parâmetros das variáveis de entrada é dependente dos resultados de saída, o que pode ser chamado de controle de realimentação de saída (BAUMEISTER; LEITÃO, 2008). Segundo Ogata (2010), nesse tipo de sistema o erro é minimizado com a realimentação do controlador com o sinal do erro atuante e a saída do sistema é ajustada ao valor desejado, conforme ilustra o esquema na Figura 12. Dessa forma, é possível obter “(...) uma regra de operação que forneça, em cada estágio do planejamento, uma decisão ótima para cada possível estado do sistema.” (MARTINEZ; FILHO, 2001, p. 1).

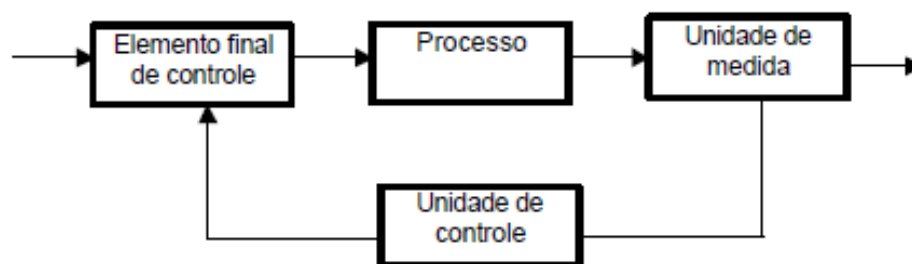


Figura 12 - Controle em malha fechada  
Fonte: Santana (2012).

De acordo com Baumeister e Leitão (2008), alguns autores consideram o controle em malha aberta uma estratégia de “controle” e em malha fechada, chamam de “regulagem”. O que faz sentido, haja vista que em malha fechada há uma reparação do erro associado ao processo através da retroalimentação do sistema. Expostas as características básicas de cada uma das estratégias, elenca-se no Quadro 1 as vantagens e desvantagens associadas a cada sistema de controle, comparando um com o outro.

	<b>Malha Aberta</b>	<b>Malha Fechada</b>
<b>Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor custo;</li> <li>• Facilidade e simplicidade de construção e manutenção;</li> <li>• Maior estabilidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior controle de distúrbio e variações de parâmetros da planta;</li> <li>• Menor sensibilidade a variações da planta.</li> </ul>
<b>Desvantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distúrbios e mudanças na calibração causam erros;</li> <li>• Regulagem periódica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mais caro;</li> <li>• Regulagem mais complexa (envolve a coleta de informações da saída);</li> <li>• Pode se tornar instável.</li> </ul>

Quadro 1 - Comparação entre sistemas de malha aberta e sistemas de malha fechada  
Fonte: Adaptado de Ogata (2010).

Por fim, mencionam-se dois conceitos: controlabilidade e observabilidade. Baumeister e Leitão (2008) explicam que em um sistema controlável, é possível encontrar uma solução de controle que leve ao alcance do estado final desejado. Em outras palavras, trata-se do estudo de “como e quando um estado específico pode ser atingido por um sistema, a partir da escolha de uma estratégia de controle apropriada” (BAUMEISTER; LEITÃO, 2008, p. 39), sendo esse o conceito aplicado nesse trabalho.

Sobre o critério de observabilidade, os autores explicam que se aplica aos sistemas em que é possível reconstruir o estado inicial a partir da saída do sistema, ou seja, refere-se ao problema de “adquirir informações sobre o estado presente de um sistema a partir da observação da saída do em tempos passados” (BAUMEISTER; LEITÃO, 2008, p. 26).

### 2.2.2 Motor de Indução

É um equipamento industrial que converte energia elétrica em energia mecânica promovendo assim, algum tipo de movimento controlado. É parte integrante de um acionamento elétrico, sendo este normalmente composto pelos seguintes elementos (WEG, 2005a):

- Motor: responsável pela conversão da energia elétrica em trabalho;
- Dispositivo eletrônico: controla a potência entregue ao motor;
- Transmissão mecânica: adapta a velocidade entre motor e a carga que será movida.

Motor elétrico é uma máquina dotada de terminais para injeção de corrente elétrica que será convertida em energia mecânica para, assim, promover movimento. Dentre os tipos de motores existentes, o mais comumente utilizado na indústria é o de indução (Figura 13), assim chamado devido seu princípio de funcionamento: a indução de tensão causada pela interação entre campos magnéticos (WEG, 2005b).

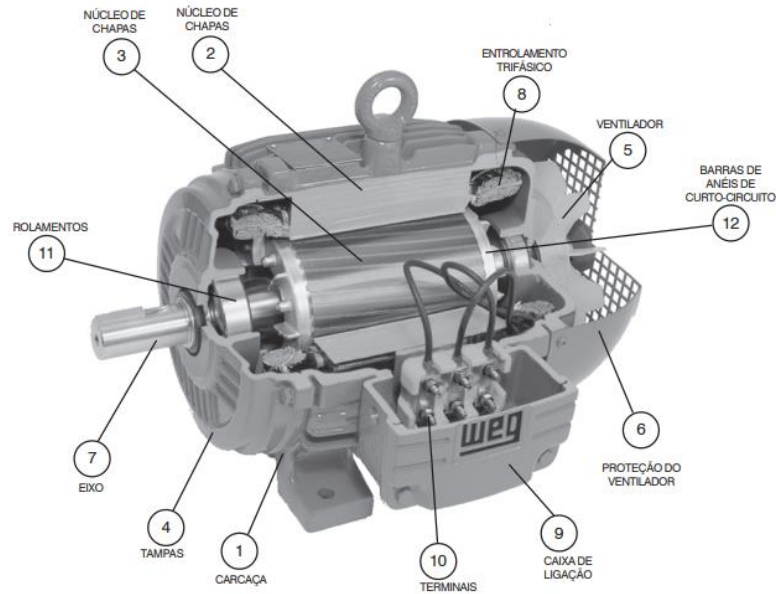


Figura 13 - Partes constituintes de um motor de indução  
Fonte: WEG (2005b).

Dentre os componentes do motor, o enrolamento trifásico, também chamado de estator (na Figura 13, representado pelos elementos 1, 2 e 8), é o responsável por iniciar o funcionamento, quando alimentado por um sistema de tensões trifásicas. A partir disso é produzido um campo magnético girante, cuja velocidade, chamada de velocidade síncrona ( $n$ ), é diretamente proporcional à frequência ( $f$ ) de sua alimentação (WEG, 2005b), conforme Equação 1. Observando a equação, constata-se que é possível manipular a velocidade do motor variando a frequência. Na prática isto é feito com a utilização dos inversores de frequência (WEG, 2005a).

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (1)$$

Onde:

$n$  = velocidade (rpm)

$f$  = frequência da rede (Hz)

$p$  = número de (polos)

As linhas de indução do campo girante cortam as espiras do rotor, produzindo a tensão que induzirá corrente no motor. Essa interação entre campos magnéticos causa o aparecimento de uma força (torque). Como o rotor é montado sobre rolamentos, ao receber esta força, o rotor gira, transmitindo energia mecânica ao eixo (WEG, 2005b).

A Figura 14 ilustra as relações entre as grandezas físicas durante o funcionamento do motor: corrente, velocidade e torque.

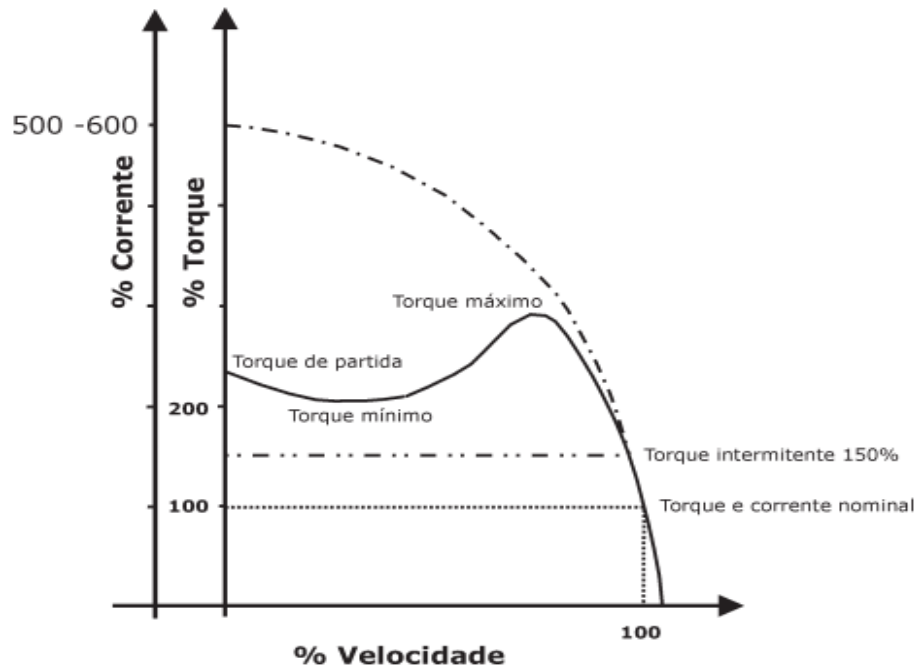


Figura 14 - Relação entre corrente, torque e velocidade de rotação do motor  
Fonte: WEG, (2005b)

Na Figura 14 pode-se verificar duas curvas:

- Corrente x velocidade: relação ilustrada pelas curvas tracejadas. Observa-se que a corrente consumida durante a partida é alta, de 5 a 6 vezes maior que a corrente nominal (linha traço-ponto), enquanto a velocidade é nula. Conforme a velocidade aumenta, a corrente diminui, caindo até alcançar um patamar determinado pela carga acoplada ao motor (quando a corrente é nominal representada pela curva traço-dois pontos).
- Torque x velocidade: a relação é ilustrada pela curva em linha cheia, que mostra que o torque de partida é de 2 a 2,5 vezes o torque nominal. Com o aumento da velocidade, o torque reduz e aumenta novamente, alcançando seu valor máximo a, aproximadamente, 80% da velocidade nominal.

Outra importante relação a se mencionar é a existente entre as velocidades síncrona e do rotor, ou em outras palavras, a velocidade entre os campos magnéticos do estator e do rotor. A diferença entre elas é chamada de escorregamento (WEG, 2005b). Juntos, os

parâmetros torque, corrente e escorregamento ajudam a classificar os motores de indução trifásicos em três tipos, as categorias de partida: N, H e D.

O Quadro 2 mostra os parâmetros que definem cada categoria. Estas são definidas pela solicitação de carga a qual o motor deverá ser submetido. Então, os motores da categoria N são aqueles indicados para cargas normais, com baixa solicitação de torque, como no caso de bombas. Os motores da categoria H são indicados para cargas que exigem maior torque de partida, como por exemplo, correias transportadoras. A categoria D é indicada para equipamentos em que a carga varia, apresentando picos periódicos, consequentemente, exigindo torque de partida alto, como no caso de elevadores (WEG, 2005b).

<b>Categorias de motores</b>	<b>Torque de partida</b>	<b>Corrente de partida</b>	<b>Escorregamento</b>
N	Normal	Normal	Baixo
H	Alto	Normal	Baixo
D	Alto	Normal	Alto

Quadro 2 - Parâmetros das categorias de motores de indução trifásico  
Fonte: Adaptado de WEG (2005b).

Por fim, é importante conhecer se o motor possui acionamento de corrente contínua (CC) ou de corrente alternada (CA), que nada mais são do que as formas através das quais a corrente é distribuída. Isto porque cada um dos tipos de acionamento possui características diferentes com relação a torque, custos, potência etc.

Portanto, garantir o bom funcionamento de um motor parte de conhecer bem tanto suas características, as relações entre elas, quanto suas futuras solicitações, de forma a bem dimensioná-lo. Um motor corretamente dimensionado é um bom princípio para garantir economia e boa performance.

### 2.2.3 Inversores de Frequência

Inversores de frequência fazem parte da família dos acionamentos, são dispositivos eletrônicos destinados a controlar a velocidade de rotação e torque do motor. Os inversores também podem ser chamados de acionamento de corrente alternada, assim como os conversores CC podem ser chamados de acionamento de corrente contínua (CAPELLI, 2002). A Figura 15 ilustra os componentes de um inversor de frequência.

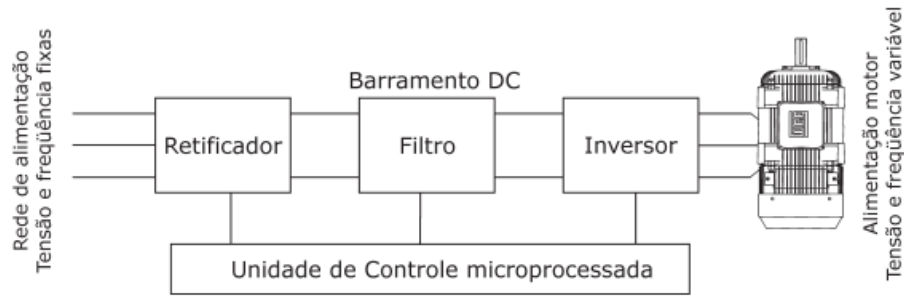


Figura 15 - Componentes de um inversor de frequência  
Fonte: WEG (2005b).

O retificador é responsável por gerar uma tensão contínua, a qual é filtrada antes de entrar no inversor. O inversor é composto por chaves (Figura 16) e, dependendo de suas posições aberta ou fechada, são gerados diferentes tipos de onda na saída. As chaves são instaladas juntamente com semicondutores chamados de transistores de potência (WEG, 2005b).

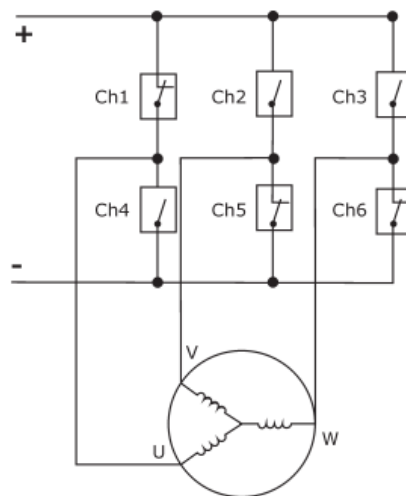


Figura 16 - Configuração das chaves no inversor  
Fonte: WEG (2005b).

Inversores alteram a tensão e/ou a frequência da alimentação e, como é possível concluir através da Equação 1, o número de rotações é diretamente proporcional à frequência. Dessa forma, ao alterá-la, altera-se a rotação da máquina na mesma proporção, considerando o número de polos ( $P$ ) constante, definido na fabricação do motor (CAPELLI, 2002).

De acordo com Côrtes (2010), este modo de funcionamento faz dos inversores de frequência o método mais eficiente para controle de velocidade nos motores de indução trifásicos e, de acordo com WEG (2005b), algumas das vantagens deste tipo de dispositivo eletrônico são: economia de energia, melhoramento do desempenho (devido ao melhor controle sobre a velocidade), elimina o pico de corrente na partida do motor e reduz a frequência de manutenção dos equipamentos.

#### 2.2.4 Atuador Linear

Atuadores lineares são dispositivos eletromecânicos responsáveis por motorizar válvulas e outros equipamentos, transformando energia elétrica em trabalho (MARTINS, 2016; BONEBERG, 2017). Neste trabalho foi utilizado um atuador elétrico em linha reta, mas existem também os hidráulicos, pneumáticos, dentre outros, sendo que cada um possui uma aplicação a que se destina com maior eficiência. No caso dos atuadores elétricos, estes são mais indicados a instalações simples, com capacidade de carga variando de baixa até média (KALATEC, 20--).

O atuador executa movimentos controlados de avanço e retorno, com parâmetros definidos, de forma que a movimentação seja precisa e suave. Para isso, movimentos rotacionais no eixo são transformados em movimentos lineares, conforme ilustra o esquema na Figura 17: o motor transmite um torque ( $T_m$ ), o qual é convertido em velocidade angular ( $\omega_m$ ), esta, por sua vez, é transmitida, engrenagem por engrenagem, até o parafuso de potência, responsável pela aplicação do movimento linear.

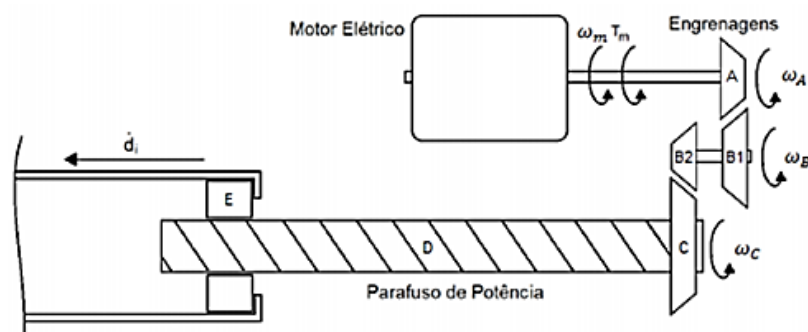


Figura 17 - Esquema de um atuador linear  
Fonte: Martins (2016).

A vantagem de se utilizar um atuador elétrico está no tipo de alimentação dispensando bombas ou compressores. No caso deste projeto, o atuador linear se destinou ao controle da inclinação do disco de pelletização.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

As próximas seções apresentarão as informações referentes ao desenvolvimento deste trabalho, incluindo detalhes da construção do equipamento, dos parâmetros de processo, da caracterização da matéria-prima a ser utilizada, da implantação da automação e da classificação do produto gerado.

Vale ressaltar que os testes foram realizados em duas etapas: no primeiro momento uma sequência de testes foi realizada com o controle manual dos parâmetros inclinação, velocidade angular e quantidade de água, para que fossem encontradas as melhores condições de geração de um produto pequeno, médio e grande. Posteriormente o equipamento foi programado para geração desses três tamanhos de produto e em um segundo momento foram realizados testes com o equipamento já automatizado produzindo os aglomerados nos tamanhos já citados, visando comprovar a eficiência do disco pelletizador. As pelotas foram caracterizadas pelo tamanho, utilizando o percentual passante acumulado, obtido por meio de peneiramento vibratório em bancada.

#### **3.1 Materiais**

A seguir apresentam-se os materiais necessários ao desenvolvimento dos testes realizados neste trabalho.

##### *3.1.1 O Equipamento*

Para a execução do trabalho, foi construído um disco pelletizador a partir de um misturador de concreto, posteriormente acionado por um motor de indução trifásico e

inversor de frequência. O equipamento passou por um processo de limpeza, corte e solda de uma superfície metálica na “panela”, onde ocorre efetivamente a aglomeração. Esses processos de fabricação foram utilizados para adequação do disco à relação diâmetro/altura recomendada para a pelotização.

A parte do equipamento onde o material será alimentado e a pelotização será efetivamente realizada (“panela”) possui medidas aproximadas de 0,90 m de diâmetro e 0,20 m de profundidade. Essas dimensões estão de acordo com os dados de Moraes (2014) e Fonseca (2004), os quais citam que a medida do diâmetro da “panela” deve ser entre 4 e 5 vezes a medida da profundidade da mesma. A vista frontal do equipamento é mostrada na Figura 18.

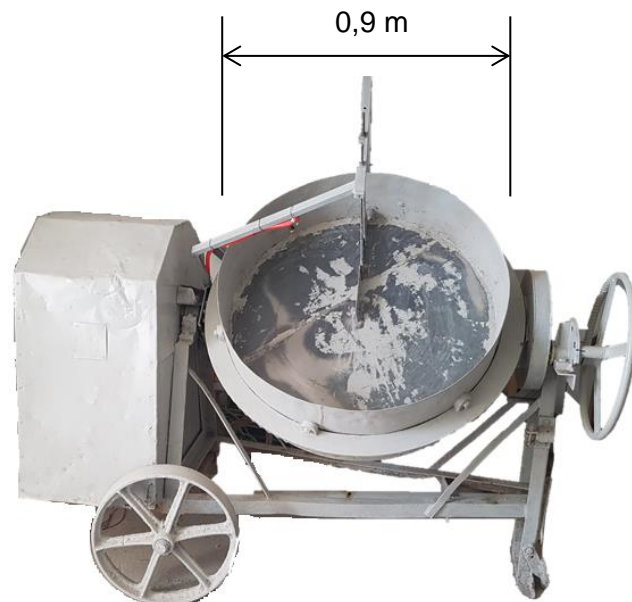


Figura 18 - Pelotizador desenvolvido (vista frontal)  
Fonte: Autoria própria.

Também foi necessária a implantação de um sistema de raspadores (com dimensões de 0,44 m de comprimento, 0,065 m de altura e 2 mm de espessura) que trabalhou de forma fechada no limite entre o primeiro e o segundo quadrante da “panela”, para desprender a matéria prima que pudesse se aderir ao fundo do equipamento. A posição dos raspadores não foi alterada já que esta não era uma variável a ser avaliada neste trabalho.

Além disso, implantou-se a alimentação de água por meio de um *spray* pulverizador no terceiro quadrante. A vista em perspectiva do equipamento é mostrada na Figura 19 a seguir.



Figura 19 - Pelotizador desenvolvido (vista lateral)  
Fonte: Autoria própria.

A Figura 20 ilustra o sistema de acionamento do equipamento, utilizando um motor juntamente com um inversor de frequência. O motor utilizado neste trabalho foi o motor de indução trifásico WEG 1,5 CV, 1715 rpm, categoria N.

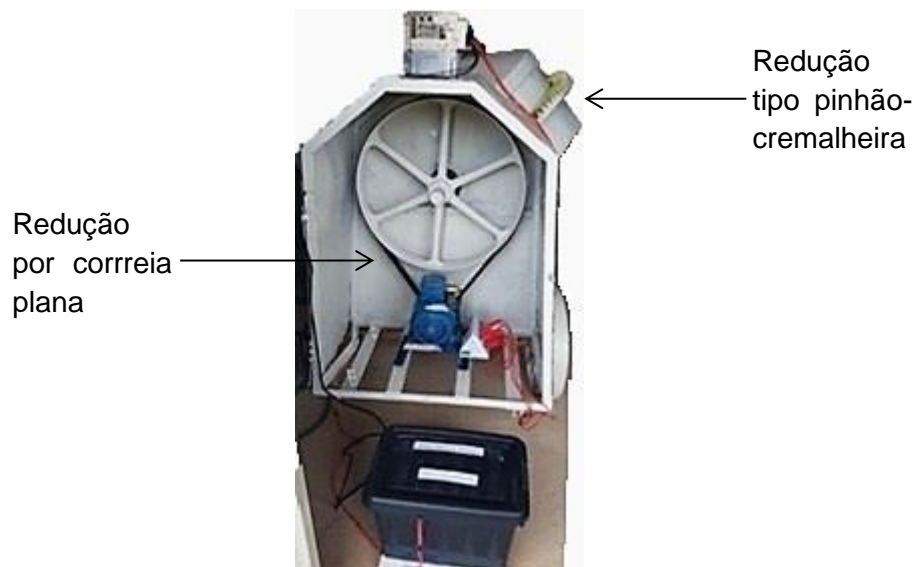


Figura 20 - Sistema motor do equipamento  
Fonte: Autoria própria.

A relação de transmissão da cremalheira para o pinhão é de 1:8 e da polia plana movida para a polia motora a relação é de 1:5. Assim, para atender à velocidade angular de 10 rpm selecionou-se uma frequência equivalente a 400 rpm no inversor. Já para a velocidade angular de 20 rpm selecionou-se uma frequência equivalente a 800 rpm.

O dimensionamento da correia se deu por meio da Equação 2:

$$L = \pi (R + r) + 2\sqrt{C^2 + (R - r)^2} \quad (2)$$

Onde:

L = comprimento da correia

R = raio da polia maior

r = raio da polia menor

C = distância entre os centros das polias

Considerando-se a polia maior com raio de 28,1 cm e a polia menor com raio de 5,5 cm aproximadamente, com a distância entre os centros de ambas de 40,8 cm, foi dimensionada uma correia com aproximadamente 200 cm de comprimento.

A velocidade angular foi controlada pelo inversor de frequência e variada em 10 (22,43% da velocidade crítica) e 20 rpm (44,86% da velocidade crítica), sendo conseguidas com 13,85 Hz e 27,7 Hz de frequência, respectivamente. A velocidade crítica representa o valor a partir do qual não há aglomeração significativa por não haver o rolamento das partículas, ficando as mesmas aderidas à borda do equipamento. Os valores de velocidade angular são os mesmos recomendados por Maia (2011), Moraes (2014) e Veverka e Hinkle (2001). A Figura 21 mostra o inversor de frequência utilizado neste trabalho.



Figura 21 - Inversor de frequência utilizado  
Fonte: Autoria própria.

A inclinação foi determinada manualmente por meio de um inclinômetro instalado em um *smartphone* (Figura 22). Posteriormente, o sistema foi substituído por um atuador linear calculado para posicionar a “panela” em 45° e 50°, conforme indicação de Veverka e Hinkle (2001), Moraes (2014) e Fonseca (2004).



Figura 22 - Interface do inclinômetro  
Fonte: Autoria própria.

A Figura 23 apresenta o atuador linear utilizado para o controle da inclinação. O mesmo possui curso de 100 mm, velocidade de 20 mm/s, força máxima de 500 N, a uma tensão de 12 V e é fabricado em alumínio.



Figura 23 - Atuador linear utilizado no trabalho  
Fonte: Autoria própria.

A quantidade de água utilizada foi de 16% e 17% da massa alimentada, equivalente a 800 ml e 850 ml respectivamente, para 5 kg de calcário por batelada, estando esses valores dentro do intervalo adotado por Garcia *et al.* (2015). Este parâmetro foi controlado medindo-se a vazão no ponto de alimentação de água, obtendo-se o tempo necessário para cada teste conforme suas especificidades.

A calibração da medição de água foi realizada monitorando a vazão no ponto de alimentação durante aproximadamente dois meses em dias e horários alternados. A pressão de água foi considerada constante em virtude de o nível de água no reservatório ser irrelevante em relação à altura do mesmo comparada à do ponto de alimentação utilizado para realização dos testes. Assim, foi encontrado o tempo de alimentação de água necessário para se conseguir os 16% e 17% já citados.

Para a automação da adição de água houve a inserção de uma válvula para o controle da passagem de água. A válvula utilizada é mostrada na Figura 24.

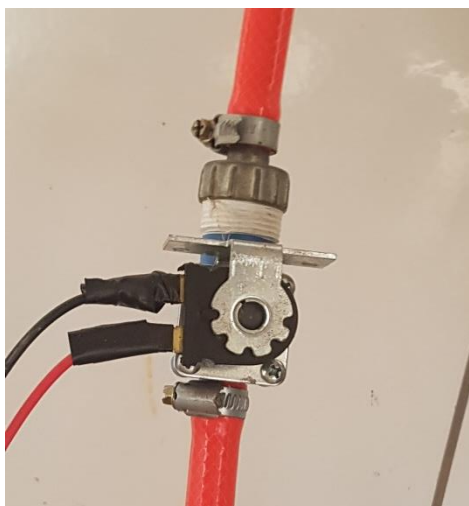


Figura 24 - Válvula utilizada  
Fonte: Autoria própria.

Vale ressaltar que o tempo de duração do teste começa a ser contado a partir do momento em que se inicia a alimentação de água no equipamento. A Figura 25 mostra o *spray* aspersor em funcionamento. O mesmo foi posicionado direcionando a água ao terceiro quadrante da “panela” do equipamento.



Figura 25 - Spray aspersor utilizado  
Fonte: Autoria própria.

### 3.1.2 Caracterização da matéria-prima

A matéria prima foi adquirida em doze sacos de 25 kg e em seguida foi homogeneizada pelo empilhamento tipo *windrow*. O processo consiste em empilhar o material em cordões sucessivos longitudinais paralelos em cada camada da pilha, sendo que os cordões da camada superior se intercalam aos da camada inferior. A Figura 26 ilustra as pilhas formadas.



Figura 26 - Empilhamento tipo *windrow* para homogeneização do calcário  
Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, o material foi misturado com o auxílio de pás e coletaram-se seis quantidades de material em pontos diferentes, para composição da amostra para execução dos ensaios de peneiramento e determinação da massa específica. Essa amostra foi devidamente homogeneizada e fracionada em quarteador tipo Jones (Figura 27).



Figura 27 - A) Quarteamento da matéria prima B) Amostra quarteada  
Fonte: Autoria própria.

O calcário utilizado nos testes é do tipo dolomítico (fonte de carbonato de cálcio obtida da rocha dolomita -  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). A análise química fornecida pelo fabricante é apresentada na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Composição do calcário utilizado

CaO	MgO
30%	18%

Fonte: Pirecal (2018).

Foram efetuados ensaios de picnometria para determinação da massa específica do calcário utilizado nos experimentos. O método, que recebe esse nome por utilizar uma vidraria denominada picnômetro, consiste em efetuar quatro pesagens denominadas respectivamente de  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  e  $m_4$ , onde  $m_1$  é a massa do picnômetro vazio e seco,  $m_2$  é a massa do picnômetro com a amostra,  $m_3$  é a massa do picnômetro com a amostra e água,  $m_4$  é a massa do picnômetro com água.

A massa específica do material é encontrada pela Equação 3 mostrada abaixo:

$$\rho_{\text{sólido}} = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \quad (3)$$

Foram realizados três testes em picnômetro de 50 ml. As massas de material foram medidas em balança de precisão com três casas decimais, e quando necessária a adição de água, a mesma era feita por meio de pisceta.

Para cada ensaio foram encontradas as massas  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  e  $m_4$ , e determinadas seus resultados de massa específica. A densidade foi obtida pela média dos resultados dos três ensaios, obtendo-se um valor de  $2,638 \text{ g/cm}^3$  estando próximos aos valores encontrados na literatura. Os resultados de cada ensaio são mostrados na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de picnometria

Massa (g)	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
$m_1$	27,389	23,366	27,335
$m_2$	40,471	34,315	40,800
$m_3$	82,928	80,452	80,406
$m_4$	74,726	73,647	72,136
Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )	2,680	2,642	2,592

Fonte: Autoria própria.

A análise granulométrica da matéria prima foi realizada por meio de três ensaios de peneiramento vibratório a seco, em peneirador suspenso CDC PV-08 durante 20 minutos cada ensaio. A seguir, apresenta-se a série de peneiras adotada com seus respectivos tamanhos de aberturas, em mesh (#) e em milímetros (mm), para caracterização da matéria prima a ser alimentada no pelletizador:

- 60 # (0,25 mm);
- 100 # (0,149 mm);
- 150 # (0,105 mm);
- 170 # (0,088 mm);
- 200 # (0,074 mm);
- 270 # (0,053 mm);
- 325 # (0,044 mm);
- 400 # (0,037 mm).

O resultado da análise granulométrica é apresentado no gráfico a seguir (Figura 28), na forma de percentual passante acumulado dos três peneiramentos efetuados (P1, P2 e P3). Foi percebido que mais de 97% do material é passante na peneira com abertura de 100 mesh (0,149 mm), classificando esse material como fino, segundo Campos e Fonseca

(2018) e justificando sua aglomeração. Ressalta-se que foi encontrado o  $d_{50}$  da matéria prima em aproximadamente 0,063 mm.

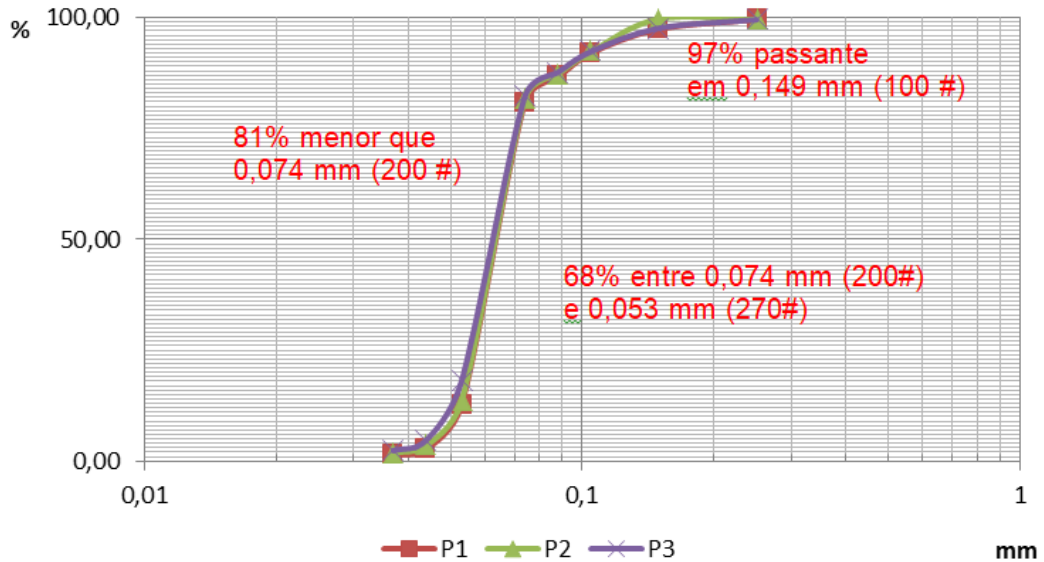


Figura 28 - Resultado da análise granulométrica  
Fonte: Autoria própria.

A análise granulométrica permitiu observar que 81% das partículas são menores que 0,074 mm (200 #) e que a maior parte do material (aproximadamente 68%) encontra-se entre 0,053 e 0,074 mm (passante na peneira de 200 # e retido em 270 #), evidenciando-se o caráter fino do calcário. As proporções, em volume, retidas em cada peneira são ilustradas pela Figura 29.



Figura 29 - Material retido em cada peneira  
Fonte: Autoria própria.

## 3.2 Métodos

Nas próximas seções são apresentados os métodos utilizados para realização dos testes deste trabalho.

### 3.2.1 Caracterização do produto

A fim de poder comparar a granulometria do produto aglomerado (por meio do ajuste manual e automático dos parâmetros) com a matéria prima alimentada no pelletizador foram realizados ensaios de peneiramento laboratorial em bancada. A massa de aglomerados resultado de cada teste foi quarteada por meio de pilhas e a Figura 30 (A), apresenta a pilha construída antes de ser quarteada, enquanto a Figura 30 (B) ilustra a mesma após o quarteamento do produto.

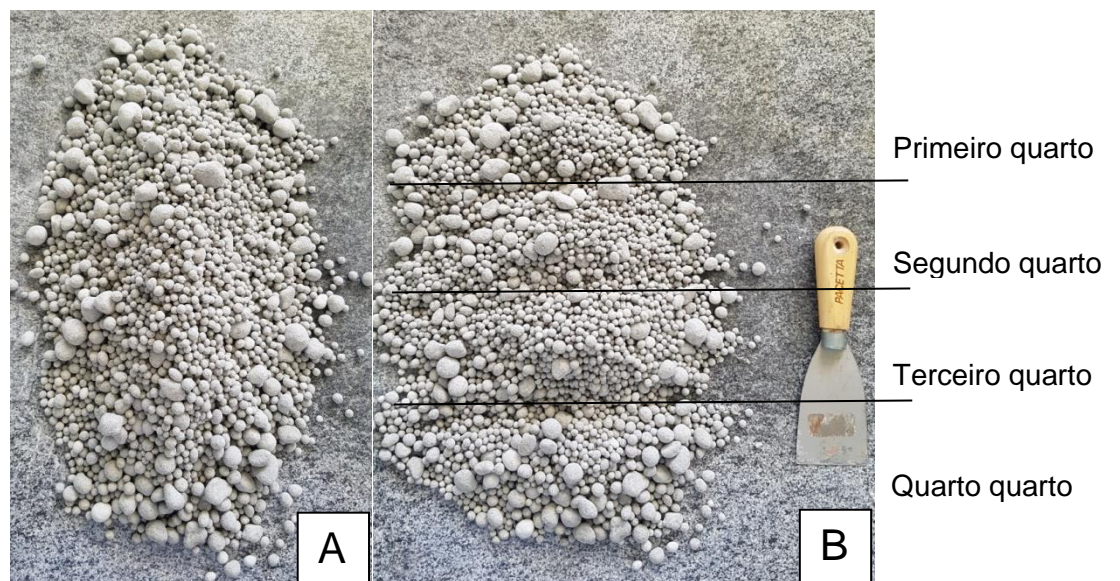


Figura 30 - Quarteamento do material  
Fonte: Autoria própria.

O peneiramento do produto de cada ensaio foi realizado em duplicata, pois não foi percebida variabilidade significativa entre os resultados do procedimento. A avaliação do produto dos testes foi feita com as pelotas cruas, ou seja, sem o tratamento térmico das mesmas, aguardando a perda de água de forma natural durante aproximadamente 24h da geração do produto.

Decorrido esse tempo, os aglomerados foram submetidos à análise granulométrica em peneiramento a seco, por agitador de bancada da marca Bertel, durante 5 minutos a uma vibração de 2 Hz, parâmetros adequados a um material grosseiro. A massa retida em cada peneira da série foi pesada e posteriormente calculado o percentual passante e passante acumulado, permitindo-se a obtenção do gráfico do percentual passante acumulado. A Figura 31 apresenta o agitador de peneiras utilizado.



Figura 31 – Agitador de peneiras utilizado na classificação granulométrica do produto  
Fonte: Autoria própria.

As aberturas de cada peneira utilizada, em polegadas, em mesh e em milímetro, para caracterização do material pelletizado (com o ajuste manual e automático dos parâmetros) foram:

- 1" (25,4mm);
- 3/4" (19,1 mm);
- 1/2" (12,7 mm);
- 3/8" (9,52 mm);
- 1/4" (6,35 mm);
- 4# (4,76 mm);
- 8# (2,38 mm);
- 10# (2 mm);
- 16# (1,18 mm).

É importante ressaltar que, devido à limitação de capacidade do peneirador, cada peneiramento do produto foi realizado em duas etapas. Assim, o fundo da peneira de 6,35 mm (material passante nessa peneira e em todas as anteriores) foi submetido a um novo peneiramento nas malhas mais fechadas que a citada.

Realizado o peneiramento, foi gerada a curva granulométrica do percentual passante acumulado e em seguida foi identificado o  $d_{50}$  do ensaio. Essa curva granulométrica foi comparada à curva do material alimentado e pela divisão do  $d_{50}$  do produto pelo  $d_{50}$  da alimentação foi calculada a taxa de crescimento, denominada de  $\alpha_{50}$ .

### 3.2.2 Planejamento experimental

Para a geração dos parâmetros de programação e automação do disco, foram realizados testes de aglomeração em batelada, com 5 kg de calcário e duração de 30 minutos cada, sendo a massa alimentada manualmente antes do início do giro do equipamento. Os parâmetros observados e variados durante a execução dos testes foram a velocidade angular, a inclinação do equipamento e a quantidade de água alimentada na mistura.

Na realização dos testes para identificação dos valores dos parâmetros a serem utilizados na programação, foi adotado um planejamento fatorial em dois níveis ( $2^k$ ), analisando-se as três variáveis combinadas duas a duas. Assim, os valores de inclinação, velocidade angular e quantidade de água foram combinados entre si, resultando em oito testes, conforme mostra a Tabela 3 a seguir. Vale ressaltar que cada teste foi realizado em triplicata, totalizando-se 24 testes.

Tabela 3 - Planejamento experimental

Sequência de Testes	Inclinação (°)	Velocidade Angular (rpm)	Quantidade de água (%)
1	45	10	17
2	50	10	17
3	50	10	16
4	45	10	16
5	45	20	17
6	45	20	16
7	50	20	17
8	50	20	16

Fonte: Autoria própria.

Foi gerada uma sequência aleatória para determinação da ordem de execução dos testes, evitando-se assim que os mesmos ocorressem de forma tendenciosa. Optou-se pelo planejamento experimental em dois níveis, pois o mesmo é capaz de caracterizar um processo discreto, indicando possíveis comportamentos do mesmo em um número relativamente pequeno de ensaios.

### 3.2.3 Programação do equipamento

A programação utilizada foi desenvolvida por meio da linguagem *Ladder* para CLP's, sendo a velocidade angular controlada por um inversor de frequência. A quantidade de água foi controlada pelo tempo de ligação da válvula e a inclinação por um atuador linear elétrico. Foi montado um painel, cuja vista frontal para a Interface Homem-Máquina (IHM) é mostrada na Figura 32.



Figura 32 - Vista frontal do painel do equipamento  
Fonte: Autoria própria.

Os componentes do painel (CLP, vista traseira da IHM e inversor de frequência) são mostrados na Figura 33.



Figura 33 - Componentes do painel  
Fonte: Autoria própria.

Ao selecionar o tamanho do produto desejado, o atuador linear ajusta a inclinação necessária. Doze segundos depois, a “panela” do equipamento começa a girar de acordo com a velocidade angular requerida. Doze segundos depois do início do giro, inicia-se a alimentação de água (média de 13 minutos) e só então os 30 minutos de teste começam a ser contados. O fluxograma do processo é apresentado na Figura 34 a seguir.

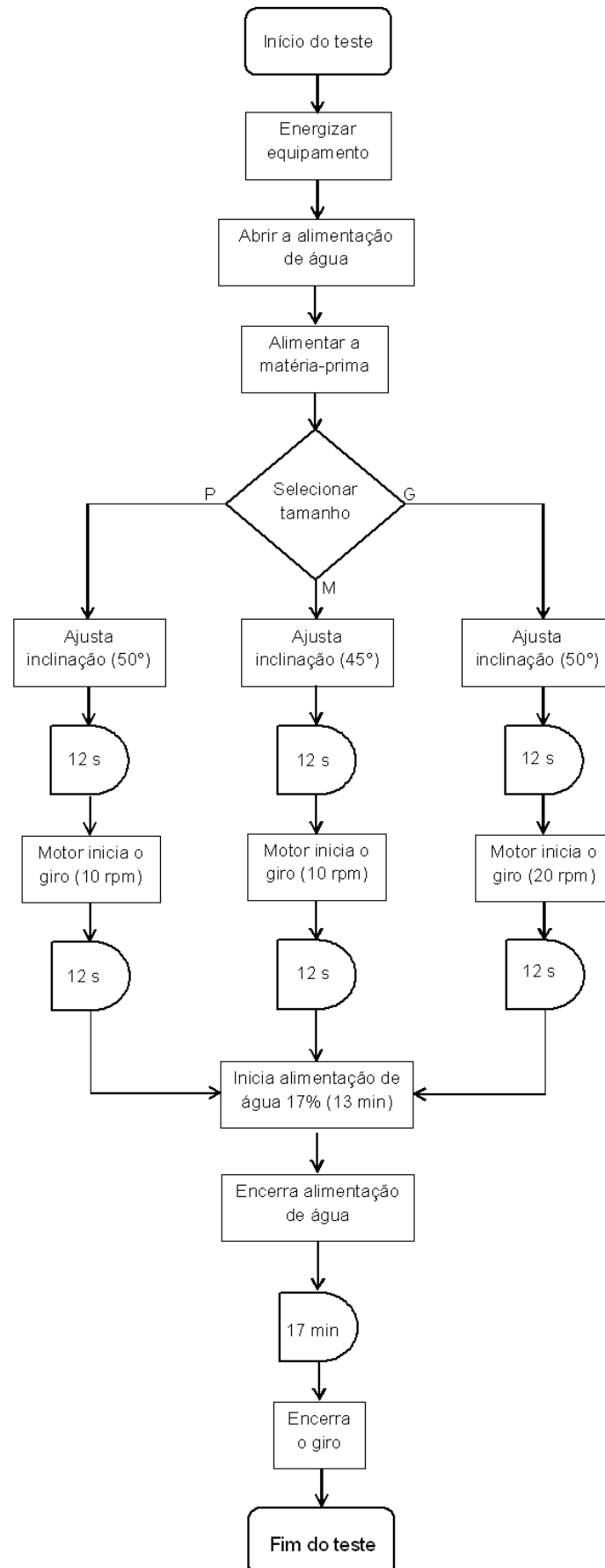


Figura 34 - Fluxograma do teste de pelotização  
Fonte: Autoria própria.

De acordo com o requerido pelo software TPW-03, do fabricante do CLP, os tempos de atuação para cada elemento final de controle foram inseridos na programação em milissegundos. A programação completa encontra-se no Apêndice A deste trabalho.

O projeto foi desenvolvido no Laboratório de Automação com o apoio do Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Goiás - Regional Catalão.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS OBTIDOS COM O AJUSTE MANUAL DE PARÂMETROS

A seguir são apresentados os resultados obtidos a partir do ajuste manual dos parâmetros de pelotização, a fim de levantar os parâmetros a serem utilizados na programação do CLP e comparar com os resultados obtidos após a pelotização automatizada, apresentada no capítulo 5. Para tal, foi considerado o planejamento  $2^k$ , já citado. Todos os gráficos apresentados nesse capítulo se referem ao percentual passante acumulado do produto na série de peneiras adotada. As tabelas com os dados referentes aos testes são encontradas no Apêndice B deste trabalho.

#### 4.1 Teste 1

O primeiro teste foi realizado com  $45^\circ$  de inclinação no equipamento, com velocidade angular de 10 rpm e 17% de água. A análise granulométrica do produto, juntamente com a média dos três testes é apresentada na Figura 35.

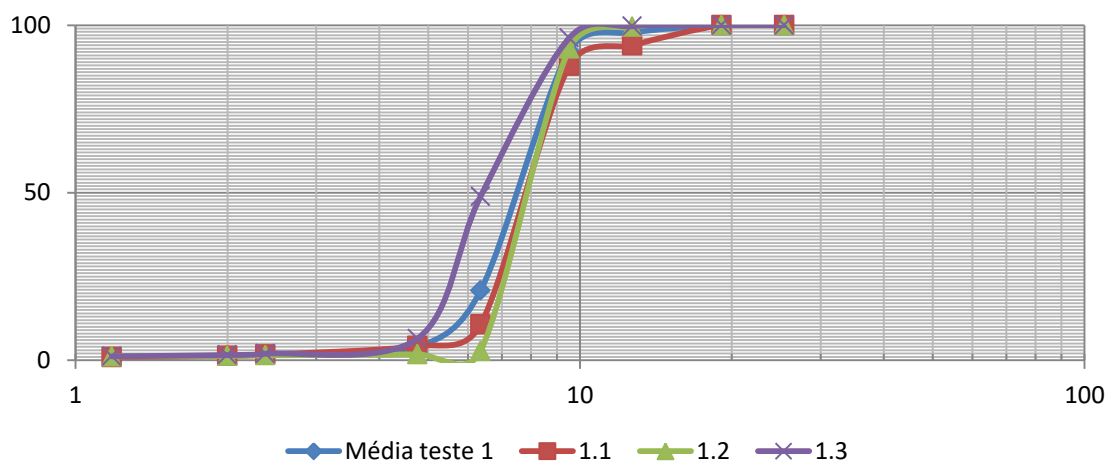


Figura 35 - Análise granulométrica do produto do teste 1  
Fonte: Autoria própria.

A Figura 36 exibe a análise granulométrica comparativa entre a alimentação e a média do produto resultante do teste 1, obtido com o ajuste manual dos parâmetros.

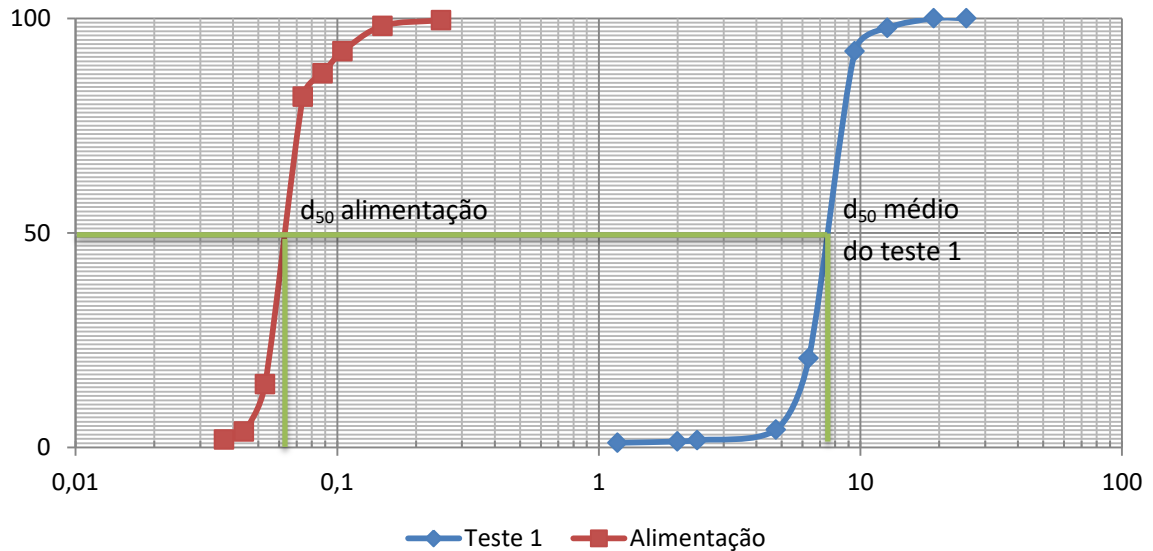


Figura 36 - Comparação entre a análise granulométrica da alimentação e a média do produto do teste 1  
Fonte: Autoria própria.

Para melhor análise identificou-se o  $d_{50}$  da alimentação em aproximadamente 0,063 mm enquanto o  $d_{50}$  do produto encontra-se em 7,672 mm. Assim, foi verificado um  $\alpha_{50}$  de 121,78, ou seja, um aumento de quase 122 vezes no tamanho do material utilizado.

O produto de uma das repetições do teste 1 é mostrado na Figura 37 a seguir.



Figura 37 - Produto do teste 1  
Fonte: Autoria própria.

Durante a execução do teste 1, foi possível perceber um produto homogêneo, conforme ilustrado anteriormente, onde em média 70% das pelotas ficaram retidas na peneira com abertura de 6,35 mm. Destaca-se que não houve material retido nas peneiras com abertura de 25,4 mm e 19,1 mm, indicando uma tendência à produção de aglomerados com tamanho mediano com a utilização dos referidos parâmetros. Além disso, não foi percebida variabilidade significativa nos resultados obtidos nas três repetições.

#### 4.2 Teste 2

O segundo teste foi realizado com 50° de inclinação no equipamento, com velocidade angular de 10 rpm e 17% de água. A análise granulométrica do produto, juntamente com a média dos três testes é apresentada na Figura 38.

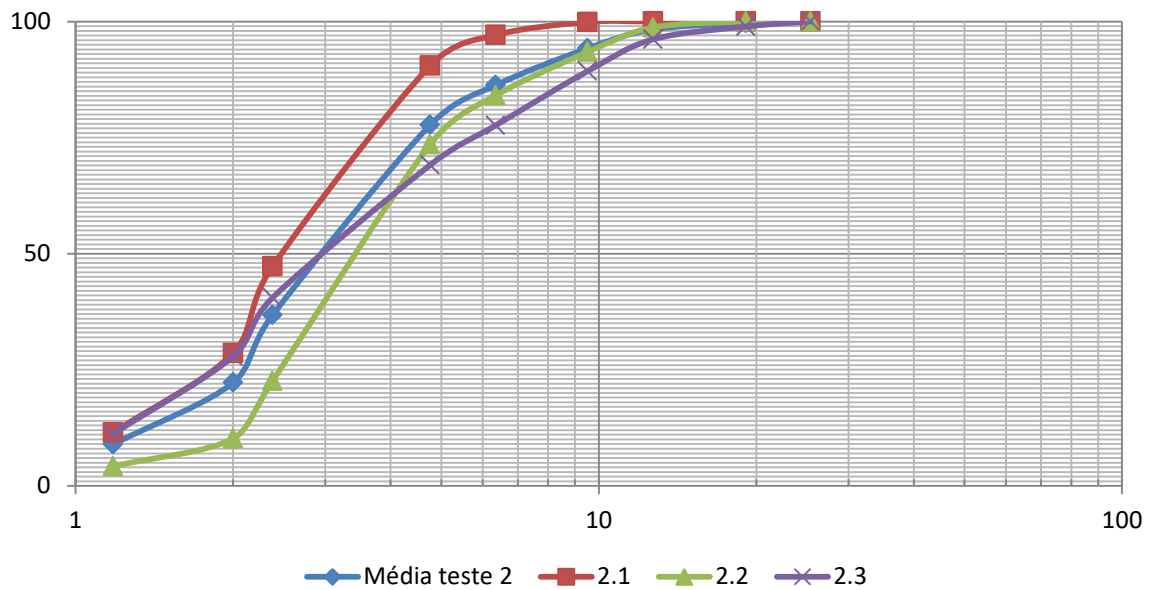


Figura 38 - Análise granulométrica do produto do teste 2  
Fonte: Autoria própria.

A Figura 39 apresenta a análise granulométrica comparativa entre a alimentação e a média do produto resultante do teste 2, obtido com o ajuste manual dos parâmetros.

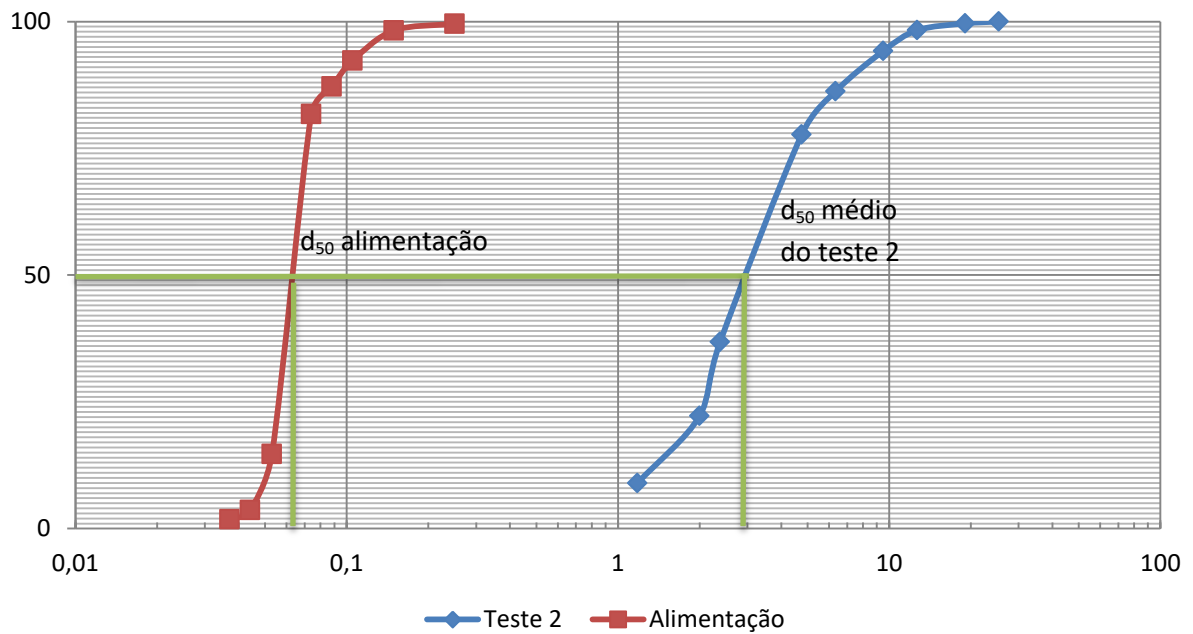


Figura 39 - Comparação entre a análise granulométrica da alimentação e a média do produto do teste 2  
Fonte: Autoria própria.

O  $d_{50}$  do produto foi identificado em aproximadamente 3 mm. Assim, foi verificado um  $d_{50}$  de 47,61, ou seja, um aumento de quase de 50 vezes no tamanho da matéria prima.

A Figura 40 apresenta o produto de uma repetição do teste 2.

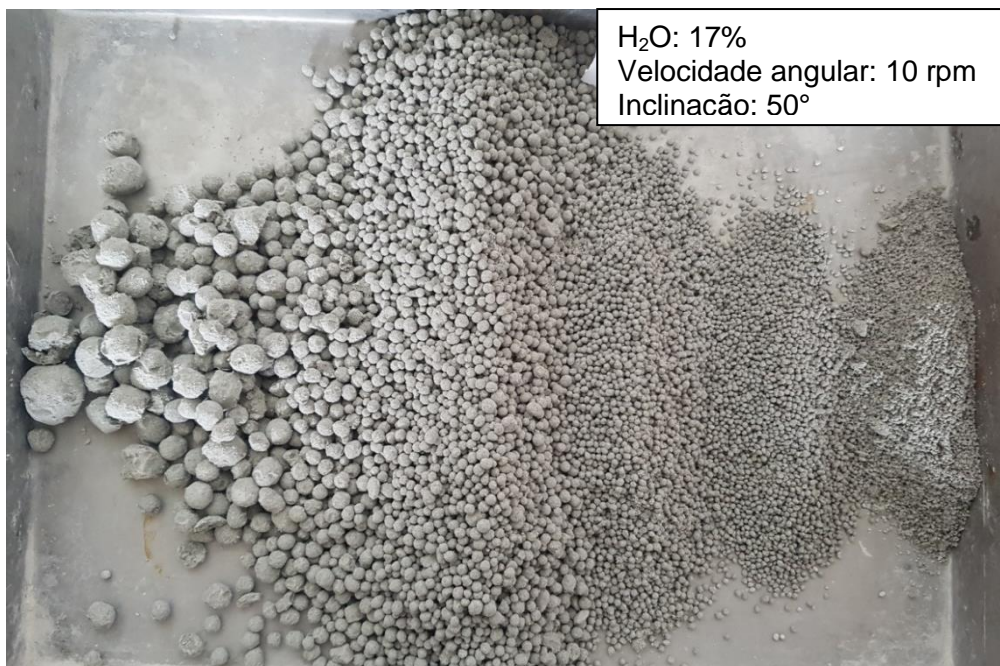


Figura 40 - Produto do teste 2  
Fonte: Autoria própria.

O teste 2 apresentou um produto mais heterogêneo como já mostrado na Figura 25 e com menor inclinação da curva granulométrica do produto, se comparada ao teste 1. Isso implicou que com a modificação da inclinação, 40% das pelotas ficaram retidas na peneira com abertura de 2,38 mm indicando uma tendência à produção de aglomerados com tamanho pequeno, com a utilização dos referidos parâmetros. Não houve material retido na peneira com abertura de 25,4 mm e foi percebida uma variação maior nos resultados obtidos durante as repetições.

### 4.3 Teste 3

O terceiro teste foi realizado com 50° de inclinação no equipamento, com velocidade angular de 10 rpm e 16% de água. A análise granulométrica do produto, juntamente com a média dos três testes é apresentada na Figura 41.

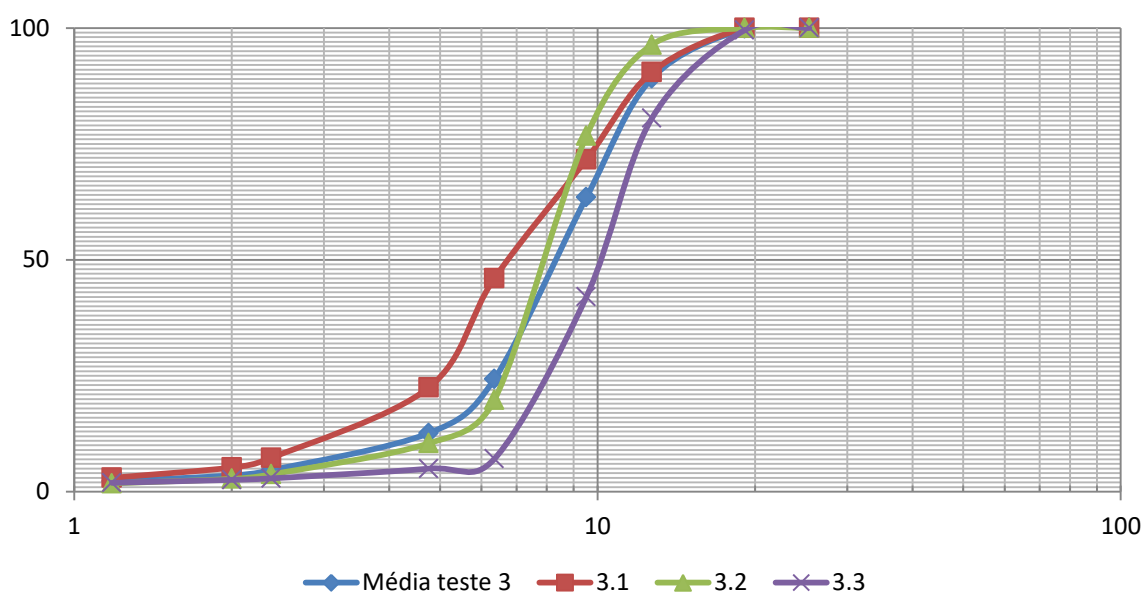


Figura 41 - Análise granulométrica do produto do teste 3  
Fonte: Autoria própria.

A análise granulométrica comparativa entre a alimentação e a média do produto resultante do teste 2, obtido com o ajuste manual dos parâmetros, são exibidas na Figura 42 a seguir.

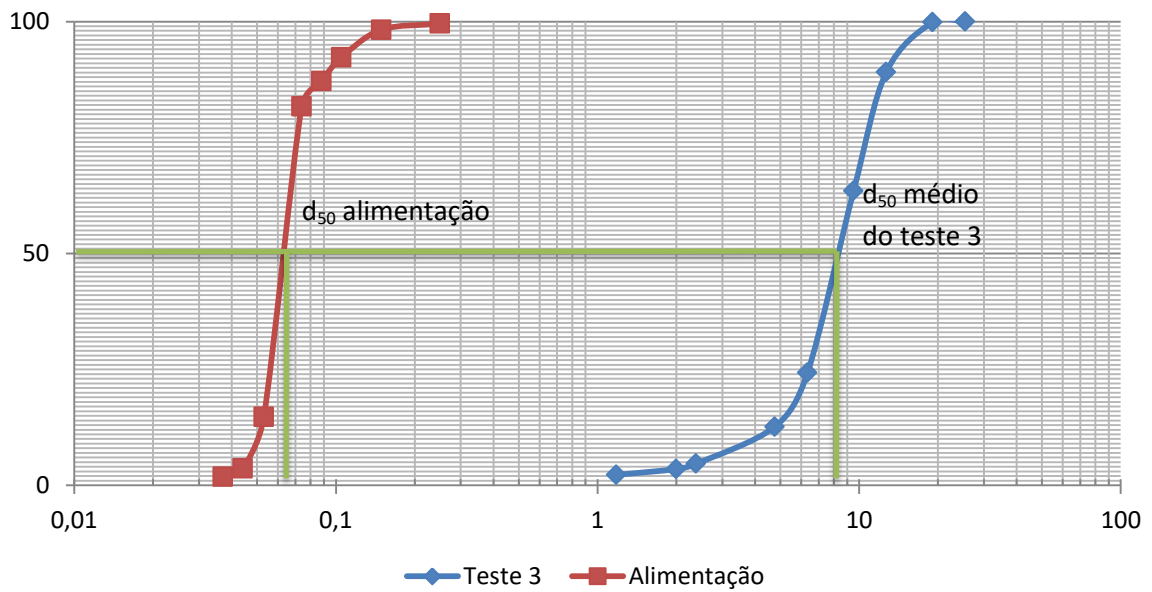


Figura 42 - Comparação entre a análise granulométrica da alimentação e a média do produto do teste 3  
Fonte: Autoria própria.

O  $d_{50}$  do produto foi identificado em aproximadamente 8,336 mm. Portanto, o  $\alpha_{50}$  é de aproximadamente 132,32, ou seja, um aumento de mais de 132 vezes no tamanho do material alimentado.

O produto de uma repetição do teste 3 é exibido na Figura 43.

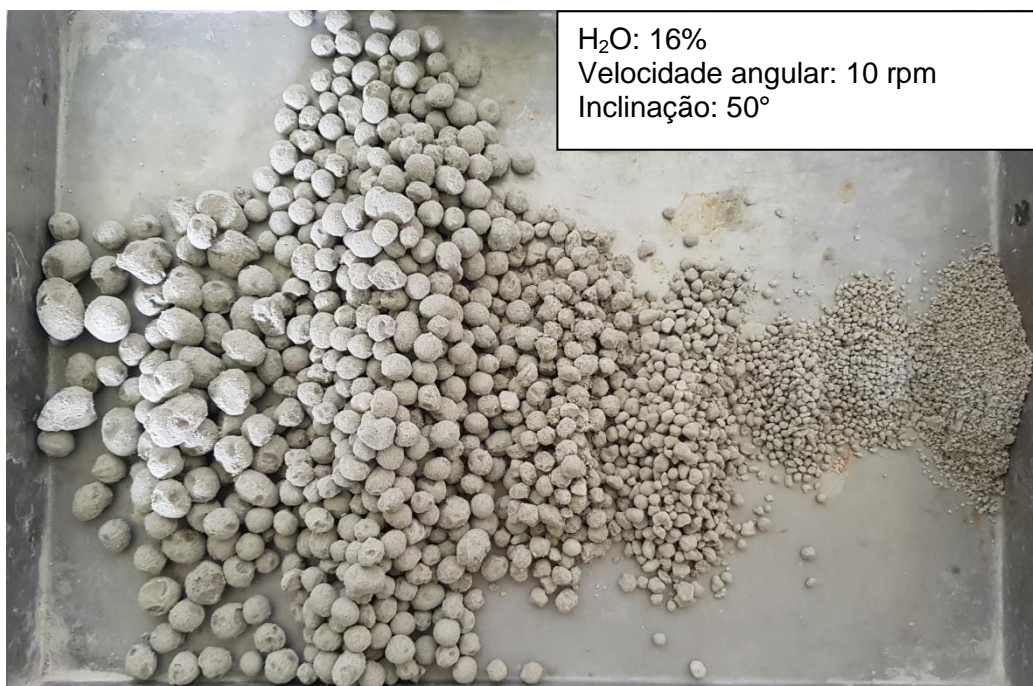


Figura 43 - Produto do teste 3  
Fonte: Autoria própria.

Com a execução do teste 3, foi possível perceber um produto mais heterogêneo, com uma granulometria mais distribuída nas peneiras com abertura de 6,35 mm e 9,52 mm. Foi percebida certa variabilidade nos resultados obtidos durante as repetições, no entanto em nenhuma houve material retido na peneira com abertura de 25,4 mm.

#### 4.4 Teste 4

O teste 4 foi realizado com 45° de inclinação no equipamento, com velocidade angular de 10 rpm e 16% de água. A Figura 44 mostra a análise granulométrica do produto, juntamente com a média das três repetições do quarto teste.

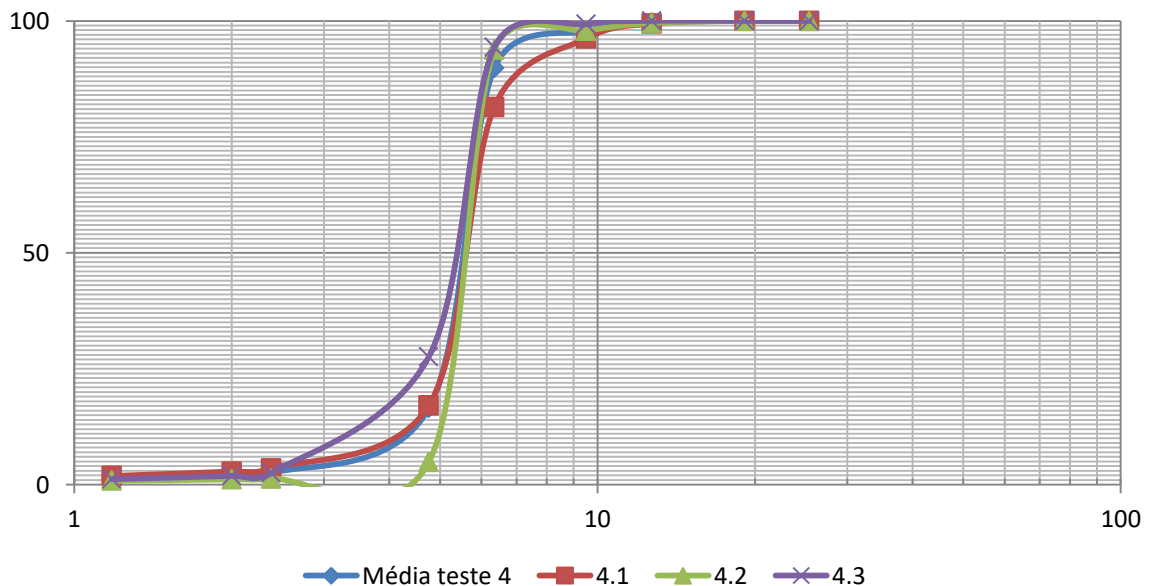


Figura 44 - Análise granulométrica do produto do teste 4  
Fonte: Autoria própria.

Para melhor análise, identificou-se o  $d_{50}$  do produto em 5,567 mm, verificando-se um  $\alpha_{50}$  de 88,37, ou seja, um aumento de 88 vezes no tamanho do material. Tal aumento é evidenciado na Figura 45 a seguir, que exhibe a análise granulométrica comparativa entre o percentual passante acumulado da alimentação e do produto.

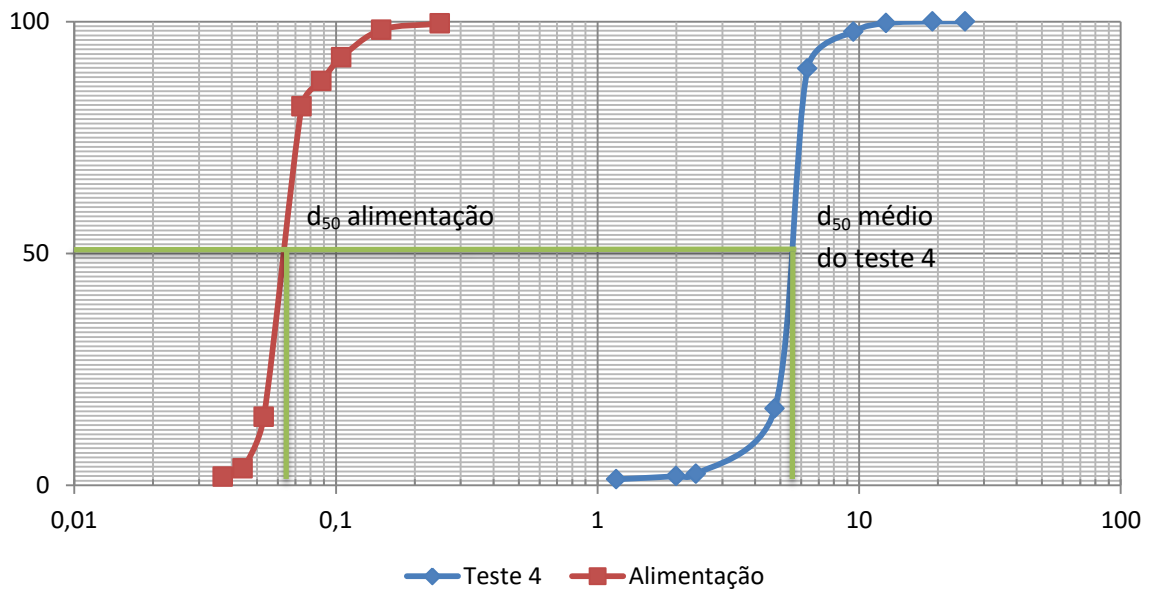


Figura 45 - Comparação entre a análise granulométrica da alimentação e a média do produto do teste 4  
Fonte: Autoria própria.

O produto de uma repetição do teste 4, obtido com o ajuste manual dos parâmetros, é exibido na Figura 46.

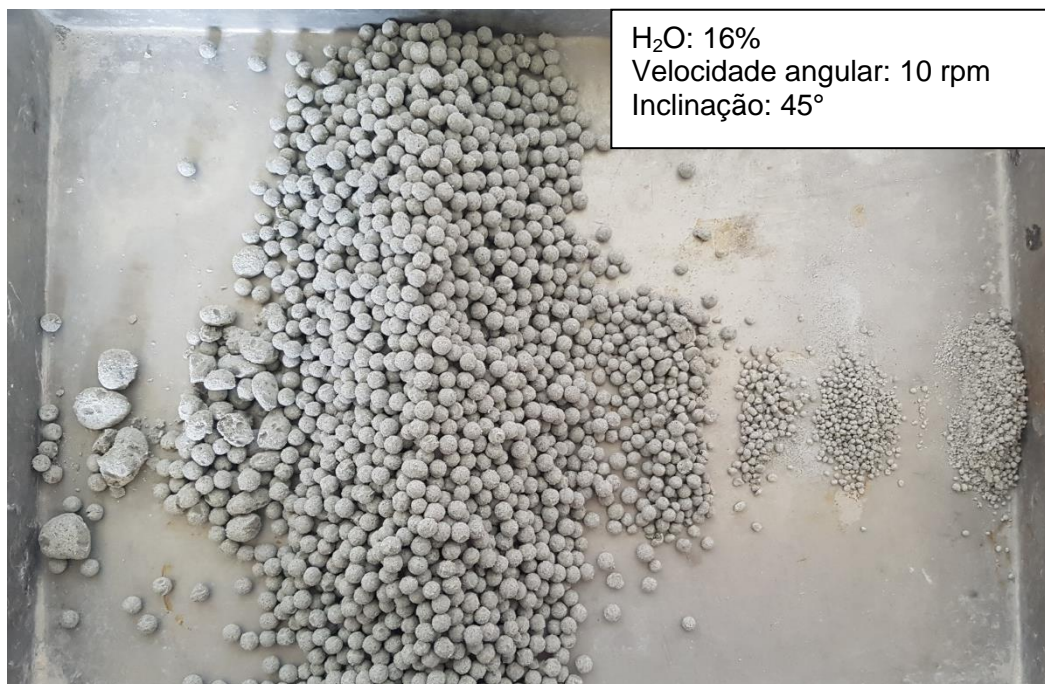


Figura 46 - Produto do teste 4  
Fonte: Autoria própria.

O produto do teste 4 mostrou-se muito semelhante ao produto do teste 1, com uma curva granulométrica inclinada indicando um resultado bastante homogêneo, o que se confirma com a ilustração das pelotas produzidas. Em média 73% das pelotas ficaram retidas na peneira com abertura de 4,76 mm e, assim como no primeiro teste, não houve material retido nas peneiras com abertura de 25,4 mm e 19,1 mm, indicando uma tendência à produção de aglomerados com tamanho mediano. Além disso, não foi percebida variabilidade significativa nos resultados obtidos nas três repetições.

#### 4.5 Teste 5

O quinto teste foi realizado com 45° de inclinação no equipamento, com velocidade angular de 20 rpm e 17% de água. A análise granulométrica do produto, juntamente com a média dos três testes é apresentada na Figura 47.

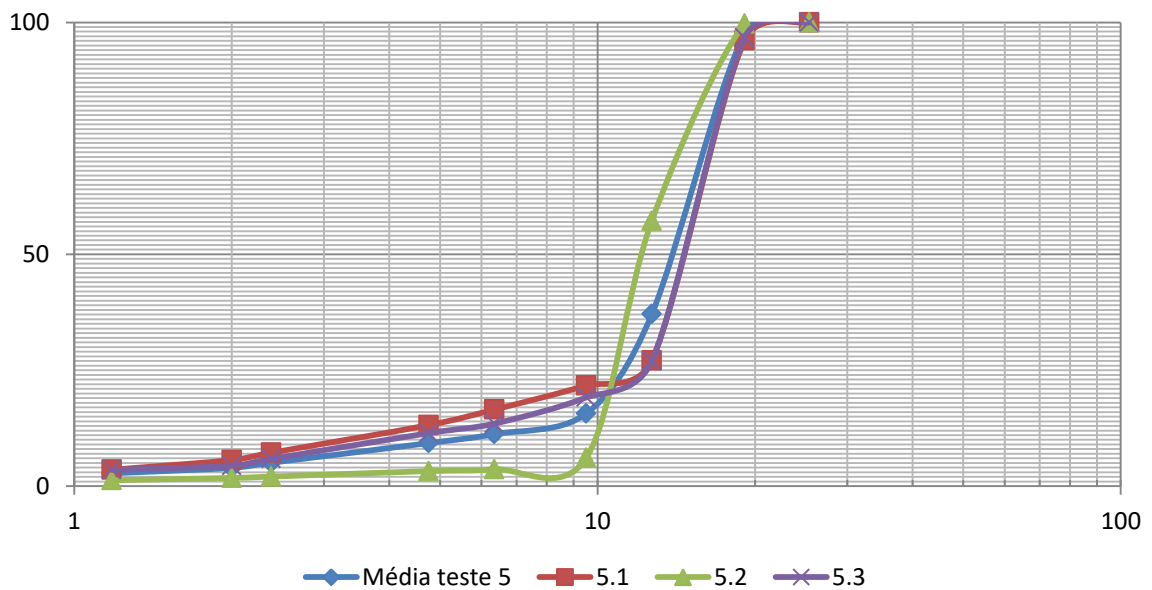


Figura 47 - Análise granulométrica do produto do teste 5  
Fonte: Autoria própria.

A análise granulométrica comparativa entre a alimentação e a média do produto resultante do teste 5 é exibido na Figura 48.

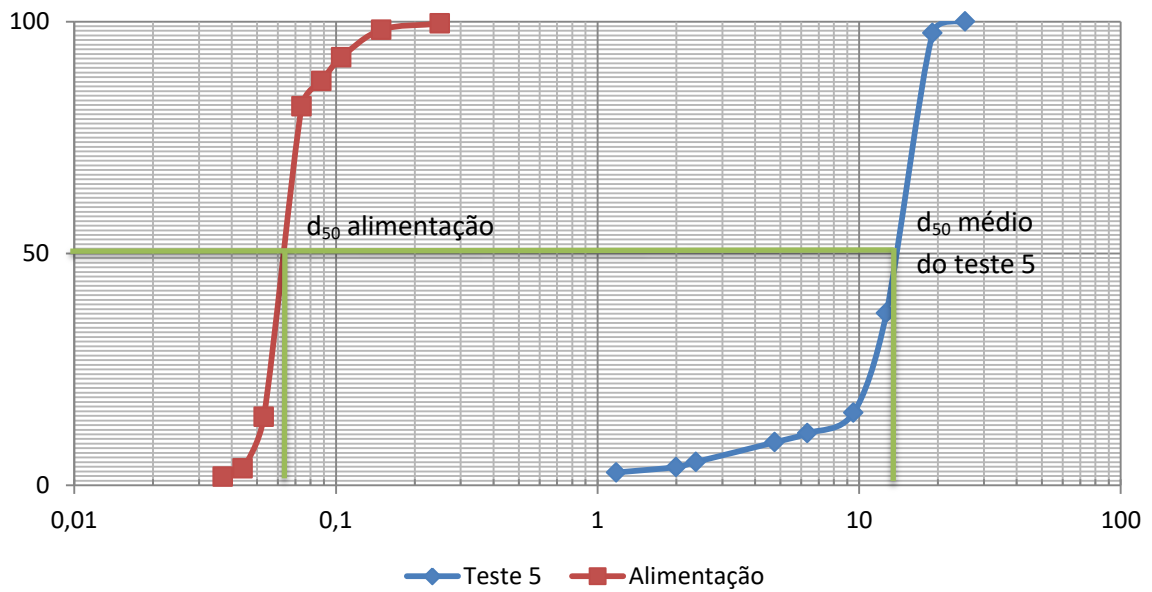


Figura 48 - Comparação entre a análise granulométrica da alimentação e a média do produto do teste 5  
Fonte: Autoria própria.

Para melhor análise identificou-se o  $d_{50}$  do produto em 14,351 mm. Assim, foi verificado um  $\alpha_{50}$  de 227,79. O produto de uma das repetições do teste 5, obtido com o ajuste manual dos parâmetros, é mostrado na Figura 49 a seguir.

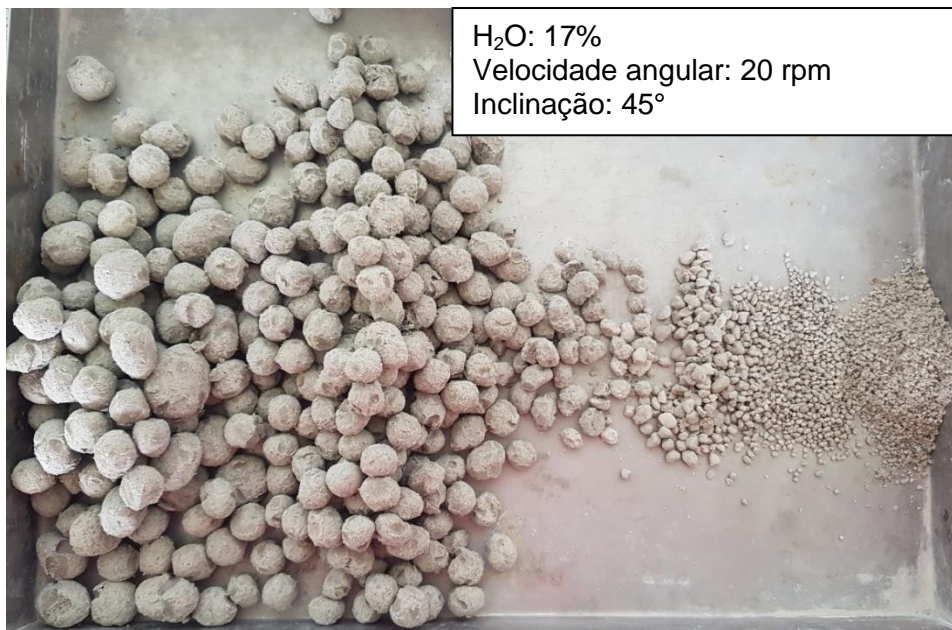


Figura 49 - Produto do teste 5  
Fonte: Autoria própria.

Com a execução do teste 5, percebeu-se uma tendência à produção de aglomerados com maior tamanho, já que, em média, 63% das pelotas ficaram retidas na peneira com abertura de 12,7 mm, mas não houve material retido na peneira com abertura de 25,4 mm. As peneiras inferiores da série adotada não receberam uma quantidade de material significativa (percentual retido inferior a 2% na maioria dos ensaios).

#### 4.6 Teste 6

O teste número 6 foi realizado com 45° de inclinação no equipamento, com velocidade angular de 20 rpm e 16% de água. A análise granulométrica do produto, juntamente com a média dos três testes é apresentada na Figura 50.

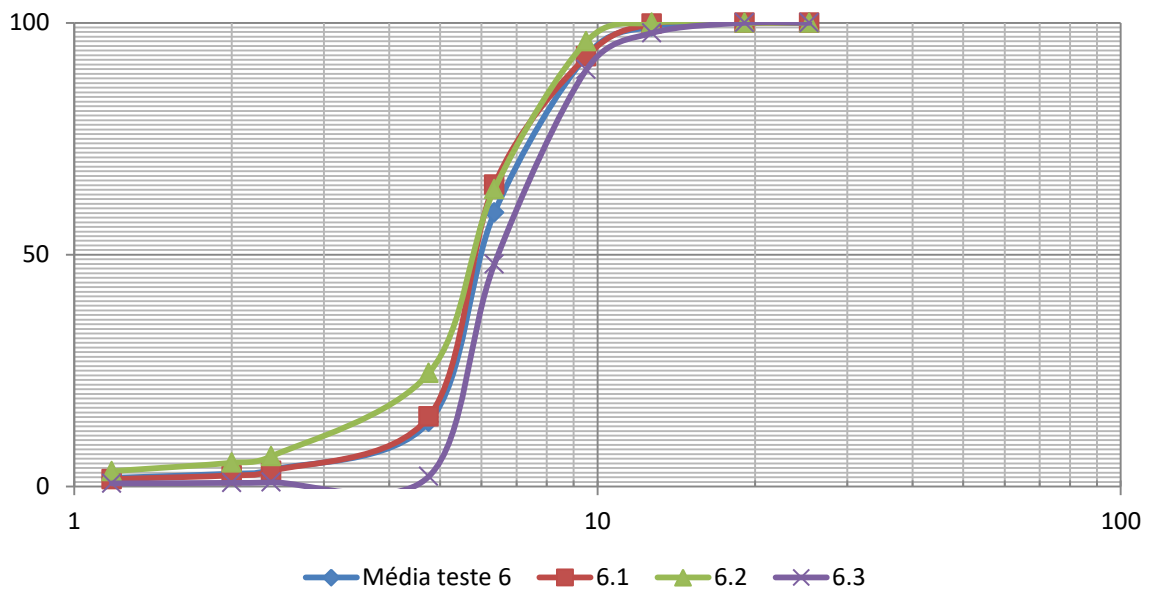


Figura 50 - Análise granulométrica do produto do teste 6  
Fonte: Autoria própria.

O  $d_{50}$  do produto encontra-se em 5,968 mm, verificando-se um  $\alpha_{50}$  de 94,73, mostrando, portanto um aumento de quase 95 vezes no tamanho do insumo. Esse aumento é exibido na Figura 51 a seguir, pela apresentação da análise granulométrica comparativa entre o percentual passante acumulado da alimentação e do produto.

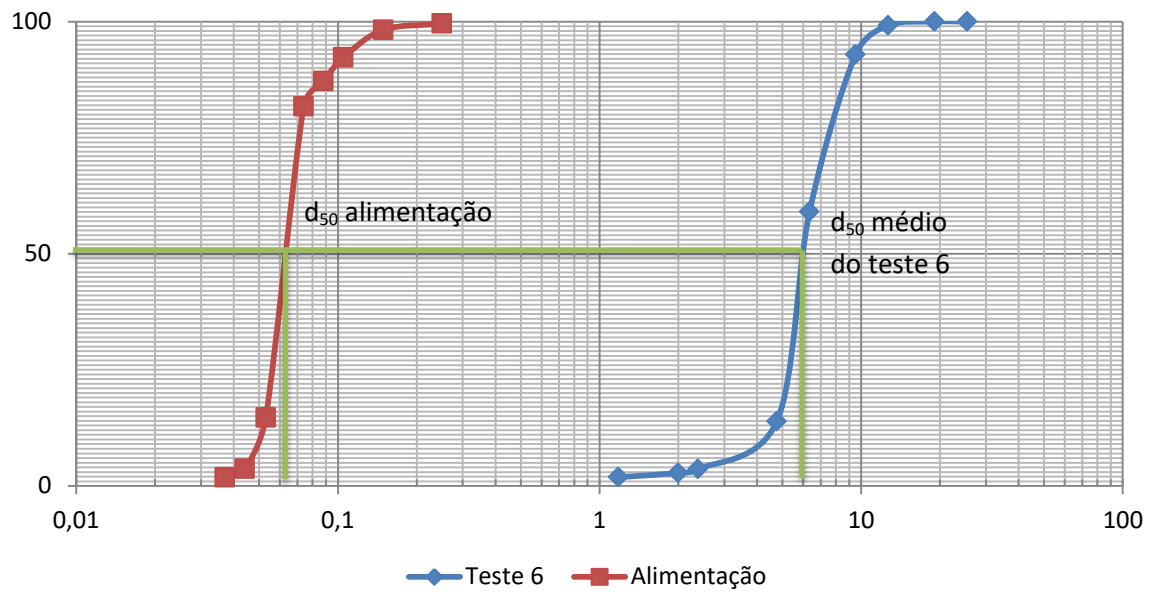


Figura 51 - Comparação entre a análise granulométrica da alimentação e a média do produto do teste 6  
Fonte: Autoria própria.

O produto de uma repetição do teste 6, obtido com o ajuste manual dos parâmetros, é exibido na Figura 52 abaixo.

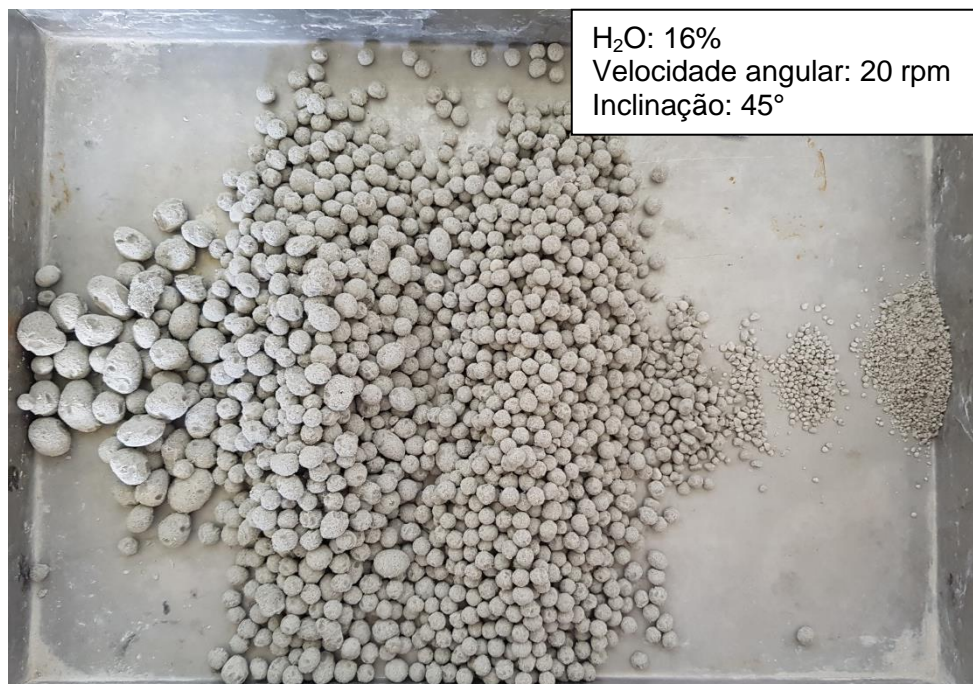


Figura 52 - Produto do teste 6  
Fonte: Autoria própria.

O produto do teste 6 também mostrou-se homogêneo, com grande parte dos aglomerados retidos nas peneiras com abertura de 4,76 mm e 6,35 mm, indicando uma tendência à produção de aglomerados com tamanho mediano. Como já citados em testes anteriores, não houve material retido nas peneiras com abertura de 25,4 mm e 19,1 mm. Nesse ensaio também não foi percebida variabilidade significativa nos resultados obtidos nas três repetições.

#### 4.7 Teste 7

O teste 7 foi realizado com 50° de inclinação, com velocidade angular de 20 rpm e 17% de água. A análise granulométrica do produto e a média dos três testes são apresentadas na Figura 53.

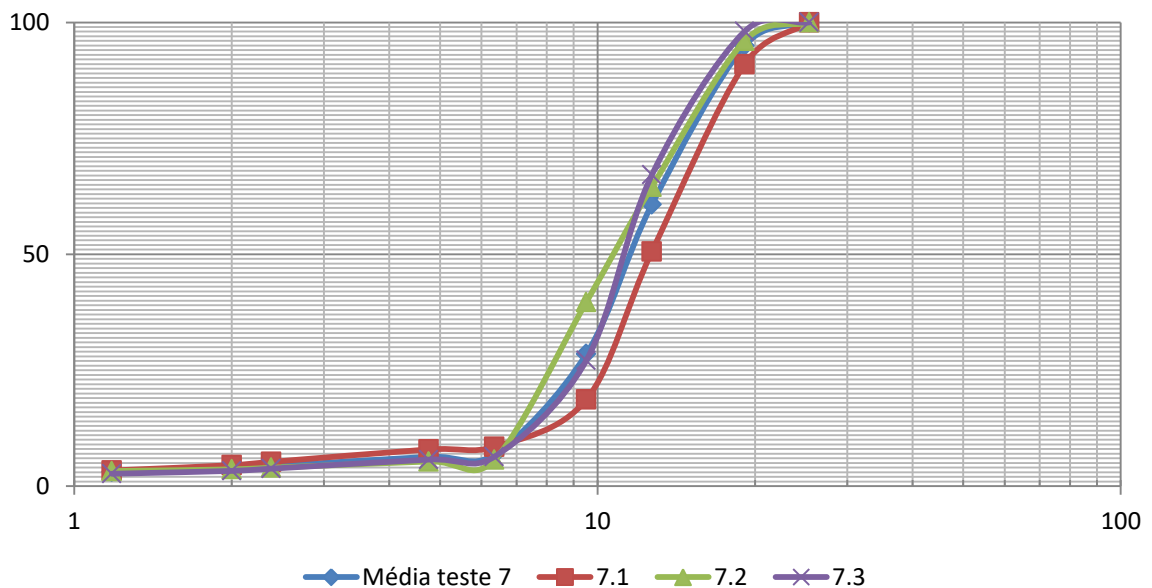


Figura 53 - Análise granulométrica do produto do teste 7  
Fonte: Autoria própria.

A análise granulométrica comparativa entre a alimentação e a média do produto do teste 7, obtido com o ajuste manual dos parâmetros, é exibido na Figura 54 a seguir.

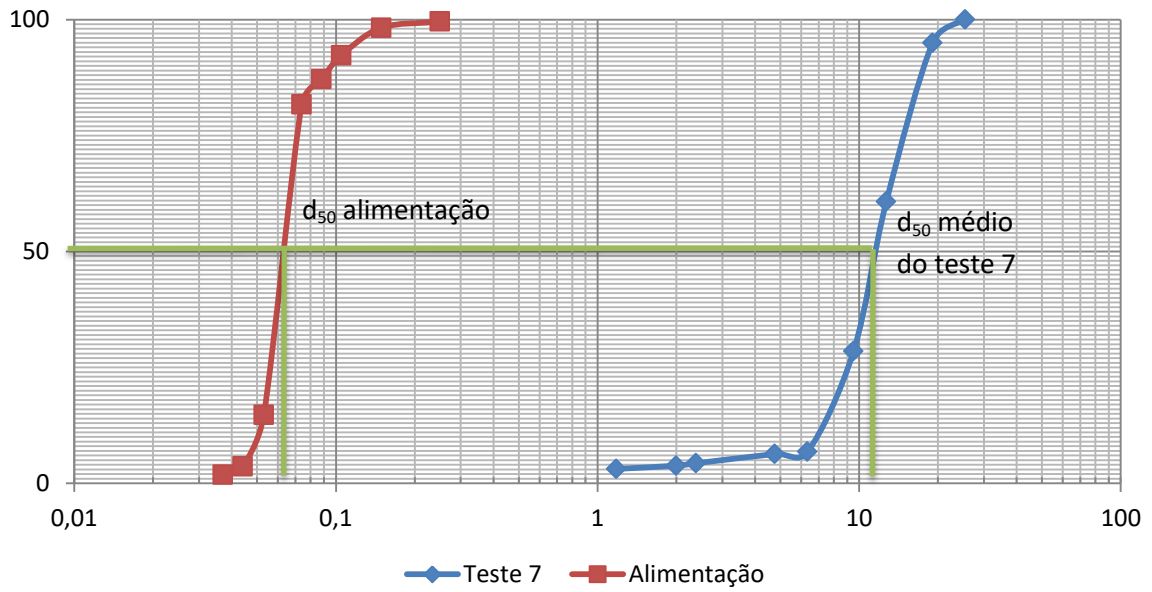


Figura 54 - Comparação entre a análise granulométrica da alimentação e a média do produto do teste 7  
Fonte: Autoria própria.

O  $d_{50}$  do produto encontra-se em 11,787 mm, verificando-se um  $\alpha_{50}$  de 187,09, mostrando um aumento significativo no tamanho do material. O produto de uma das repetições do teste 6 é exibido na Figura 55.

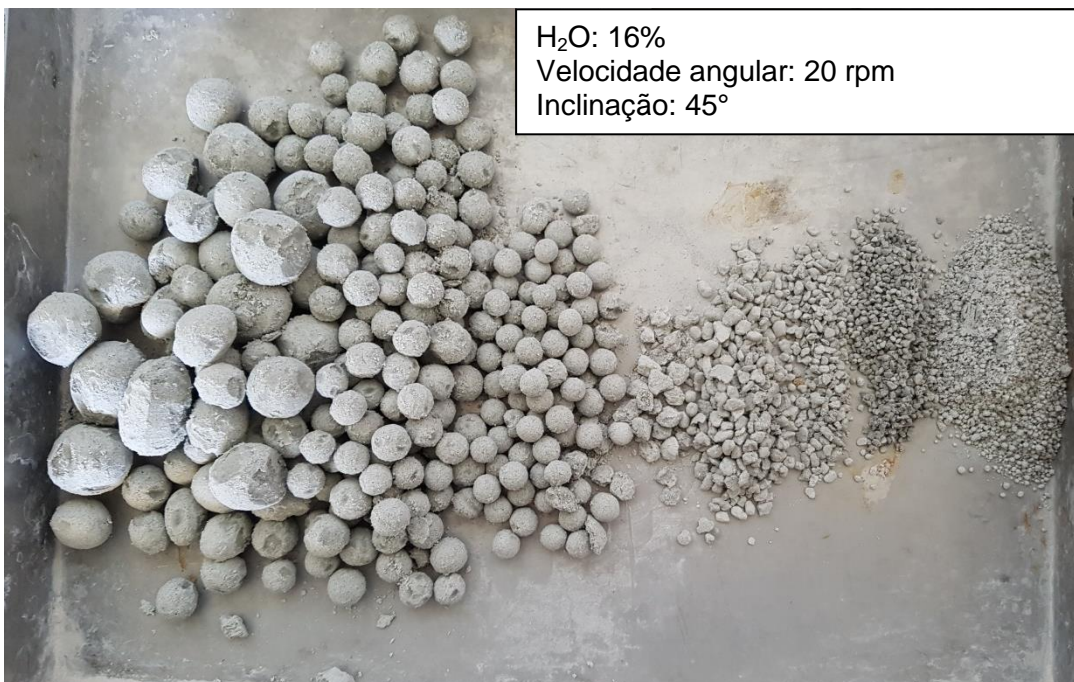


Figura 55 - Produto do teste 7  
Fonte: Autoria própria.

Com a execução do teste 7, percebeu-se uma tendência à produção de aglomerados maiores pois, em média, 65% das pelotas ficaram retidas nas peneiras com abertura de 12,7 mm e 9,35 mm, não havendo material retido na peneira com abertura de 25,4 mm. As peneiras inferiores da série adotada não receberam uma quantidade de material significativa (percentual retido inferior a 2% na maioria dos ensaios). Além disso, não foi percebida variabilidade significativa nos resultados obtidos nas três repetições.

#### 4.8 Teste 8

O último teste foi realizado com 50° de inclinação no equipamento, com velocidade angular de 20 rpm e 16% de água. A análise granulométrica do produto, juntamente com a média dos três testes é apresentada na Figura 56.

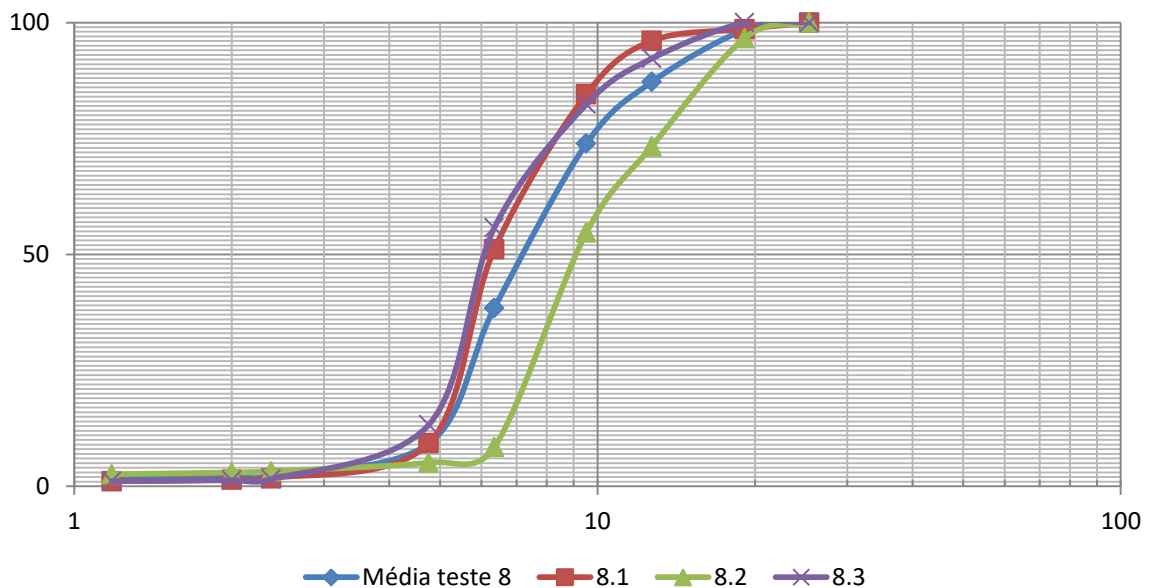


Figura 56 - Análise granulométrica do produto do teste 8  
Fonte: Autoria própria.

A análise granulométrica comparativa entre a alimentação e a média do produto do teste 8, obtido com o ajuste manual dos parâmetros, são exibidas na Figura 57.

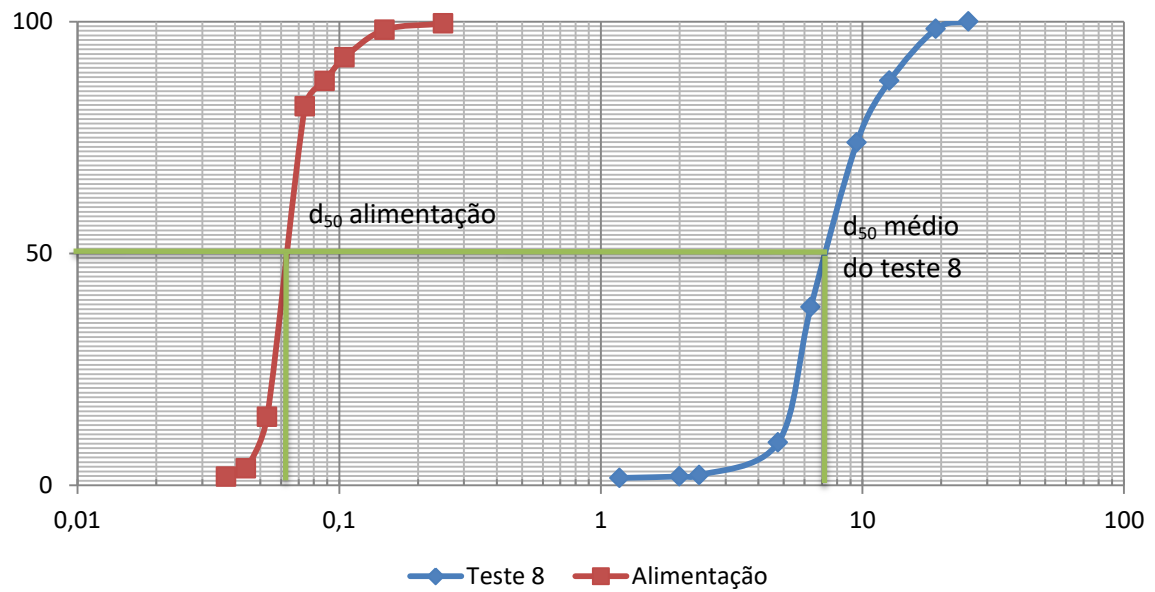


Figura 57 - Comparação entre a análise granulométrica da alimentação e a média do produto do teste 8  
Fonte: Autoria própria.

O  $d_{50}$  do produto foi identificado em aproximadamente 7,528 mm, calculando-se um  $\alpha_{50}$  no valor de 119,49, ou seja, um aumento de quase 120 vezes no tamanho da matéria prima. A Figura 58 apresenta o produto de uma repetição do teste 8.

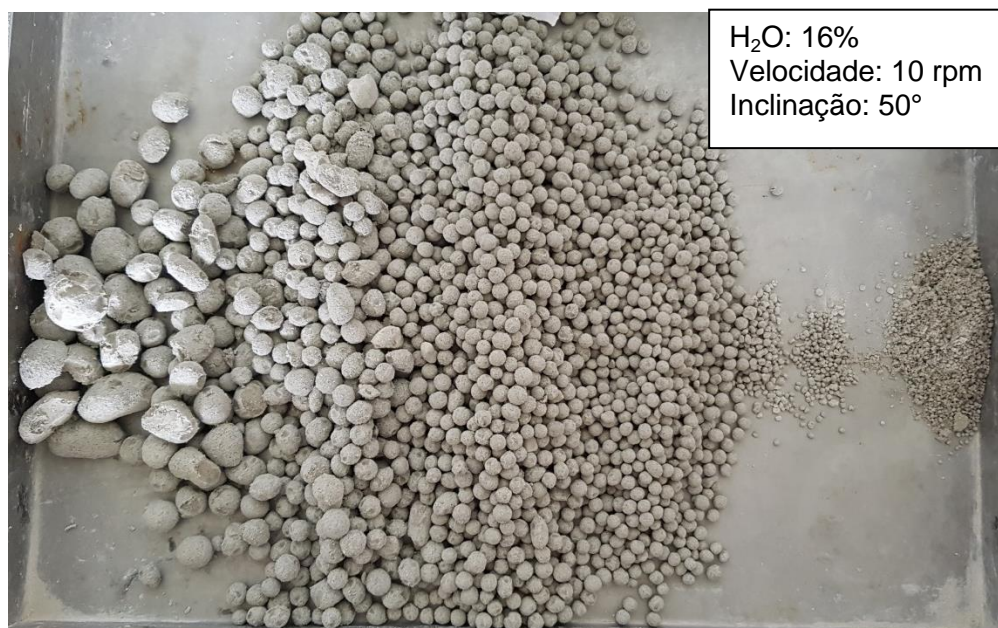


Figura 58 - Produto do teste 8  
Fonte: Autoria própria.

O produto do teste 8 em sua maior parte ficou retido nas peneiras com abertura de 4,76 mm e 6,35 mm, indicando uma tendência à produção de aglomerados com tamanho mediano. Como já citados em testes anteriores, não houve material retido nas peneiras com abertura de 25,4 mm e 19,1 mm e foi percebida certa variabilidade nos resultados obtidos durante as repetições.

#### 4.9 Testes finais

A Tabela 4, a seguir, exibe os resultados obtidos com o ajuste manual dos parâmetros de pelotização. Ressalta-se que o  $d_{50}$  da alimentação foi encontrado em aproximadamente 0,063 mm.

Tabela 4 - Resultados obtidos com o ajuste manual dos parâmetros

Teste	$d_{50}$ Produto (mm)	$\alpha_{50}$
1	7,672	121,778
2	3,000	47,619
3	8,336	132,317
4	5,567	88,3651
5	14,351	227,794
6	5,968	94,7302
7	11,787	187,095
8	7,528	119,492

Fonte: Autoria própria.

Assim, após realizados os testes previstos no planejamento experimental com suas devidas repetições, foram selecionadas três combinações de parâmetros para programação do equipamento para execução dos testes finais. Esses parâmetros foram escolhidos considerando o  $\alpha_{50}$  (um pequeno, um médio e um grande) buscando os ensaios que apresentaram as menores variabilidades entre as repetições dos testes durante a execução. Os parâmetros selecionados para a programação da “receita” de pelotização são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros selecionados para a programação

Teste	Inclinação	Velocidade angular	H <sub>2</sub> O	Tamanho do produto
2	50°	10 rpm	17%	Pequeno
1	45°	10 rpm	17%	Médio
7	50°	20 rpm	17%	Grande

Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros adotados para geração de um produto pequeno equivalem àqueles adotados no teste 2, para um produto médio são equivalentes ao teste 1 e para geração de um produto grande os parâmetros são os mesmos adotados para o teste de número 7. Vale ressaltar que a designação de produto grande foi dada aos aglomerados com maior percentual passante na peneira com abertura de 25,4 mm e retidos na de 12,7 mm. Já a de produto médio, foi dada às pelotas passantes na peneira de 12,7 mm e retidas na de 4,76 mm. Por fim, os produtos pequenos foram aqueles passantes na peneira com abertura de 4,76 mm, conforme classificação estabelecida pela própria autora.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS OBTIDOS COM O AJUSTE AUTOMATIZADO DOS PARÂMETROS

Após a automação do equipamento foram realizados os ensaios de acordo com o tamanho do produto selecionado pelo operador do equipamento na IHM (P, M ou G). Assim, para a produção de aglomerados pequenos, foram adotados os parâmetros de 17% de água, 50° de inclinação e uma velocidade angular de 10 rpm, conforme mostrado na Tabela 5. A análise granulométrica do produto resultante desse ensaio é apresentada na Figura 59 a seguir.

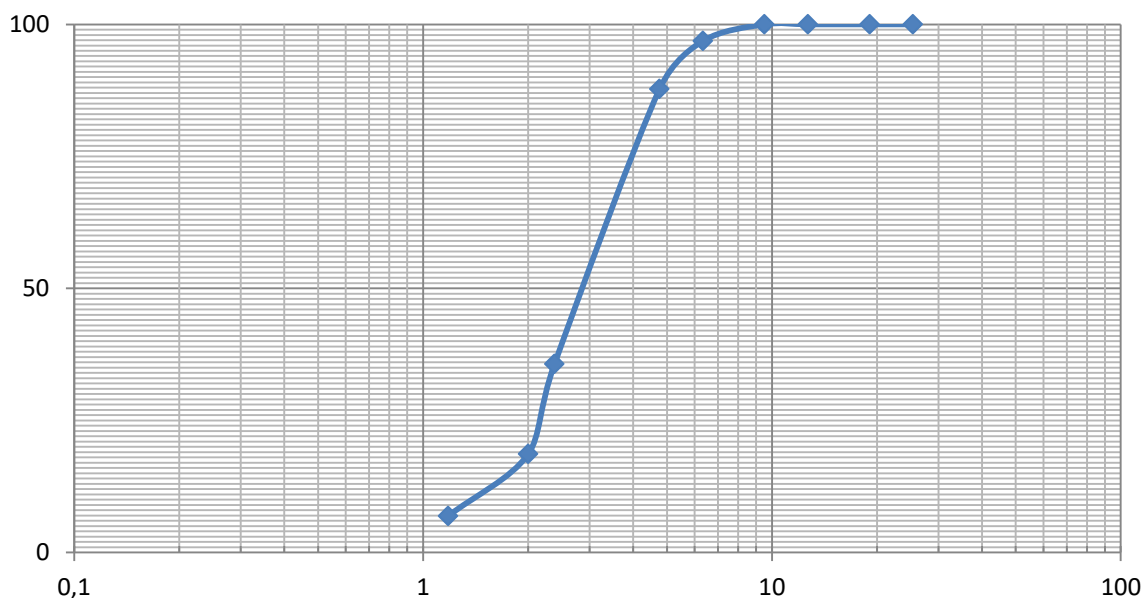


Figura 59 - Análise granulométrica do produto pequeno com ajuste automatizado dos parâmetros

Fonte: Autoria própria.

A distribuição granulométrica do produto denominado pequeno é apresentada na Figura 60.



Figura 60 - Distribuição granulométrica do produto pequeno  
Fonte: Autoria própria.

O  $d_{50}$  desse ensaio foi identificado em aproximadamente 2,89 mm, estando dentro dos limites preestabelecidos para um produto pequeno (conforme foi estabelecido para o calcário e em escala diferente do minério de ferro) e próximo ao  $d_{50}$  médio dos testes com o mesmo parâmetro antes da automação do equipamento (teste 2,  $d_{50} = 3$  mm). A Figura 61 apresenta a comparação entre as curvas do produto dos testes com os mesmos parâmetros, antes e depois da automação do equipamento.

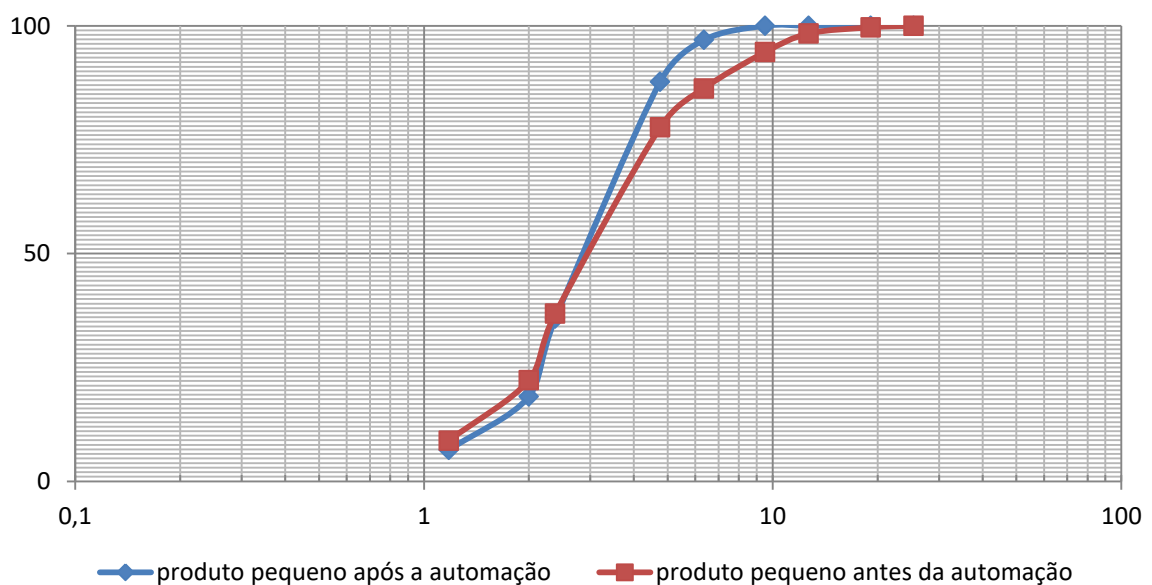


Figura 61 - Comparação da análise granulométrica do produto pequeno antes e depois da automação do equipamento  
Fonte: Autoria própria.

Para a produção de aglomerados médios, a opção M é selecionada pelo operador na IHM e o equipamento ajusta automaticamente os parâmetros de 17% de água, 45° de inclinação e uma velocidade angular de 10. A análise granulométrica do produto desse ensaio é apresentada na Figura 62 a seguir.

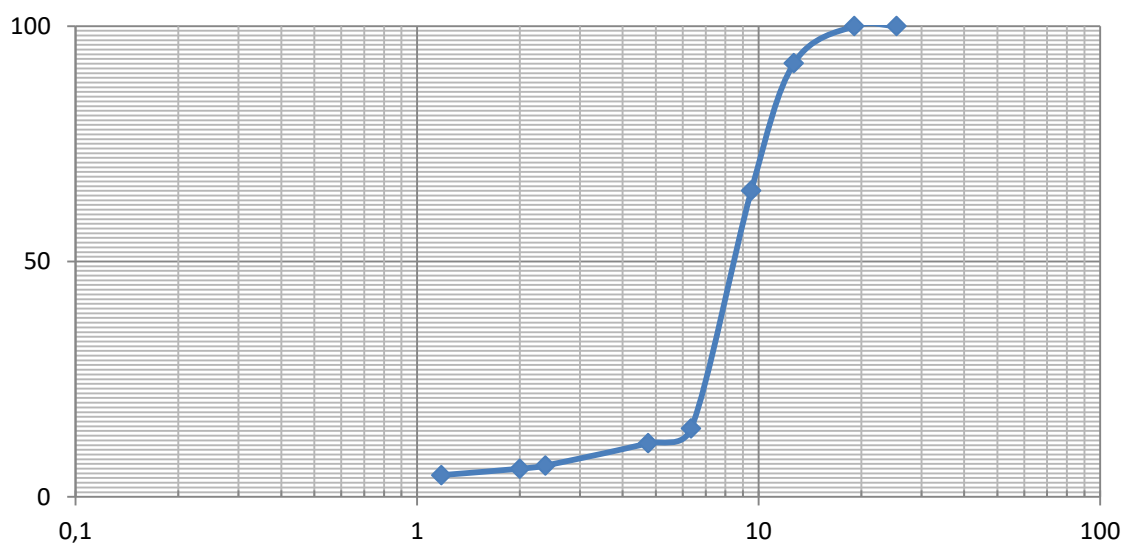


Figura 62 - Análise granulométrica do produto médio com ajuste automatizado dos parâmetros  
Fonte: Autoria própria.

A distribuição granulométrica do produto médio é apresentada na Figura 63.



Figura 63 - Distribuição granulométrica do produto médio  
Fonte: Autoria própria.

O  $d_{50}$  desse ensaio foi identificado em aproximadamente 8,57 mm, estando dentro dos limites preestabelecidos para um produto médio e próximo ao  $d_{50}$  médio dos testes com o mesmo parâmetro antes da automação do equipamento (teste 1,  $d_{50} = 7,67$  mm). A Figura 64 apresenta a comparação entre as curvas dos produtos dos testes com os mesmos parâmetros, antes e depois da automação do pelletizador.

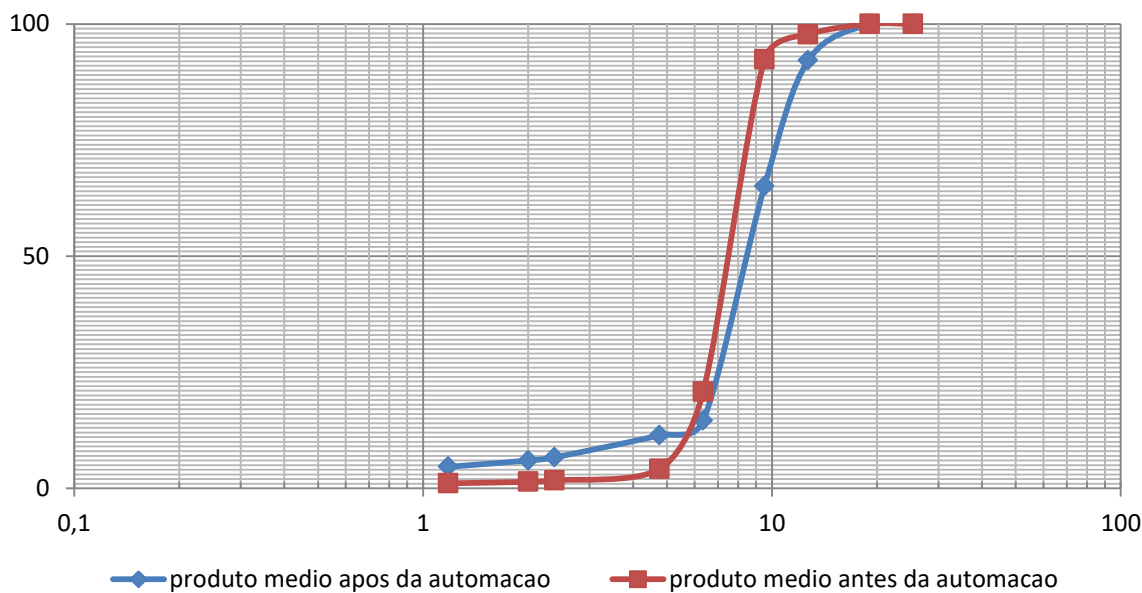


Figura 64 - Comparação da análise granulométrica do produto médio antes e depois da automação do equipamento.

Fonte: Autoria própria.

Para a produção de aglomerados grandes, basta selecionar a opção G na IHM e o pelletizador ajusta os parâmetros de 17% de água, 50° de inclinação e uma velocidade angular de 20 rpm de forma automática. A análise granulométrica do produto desse ensaio é apresentada na Figura 65 a seguir.

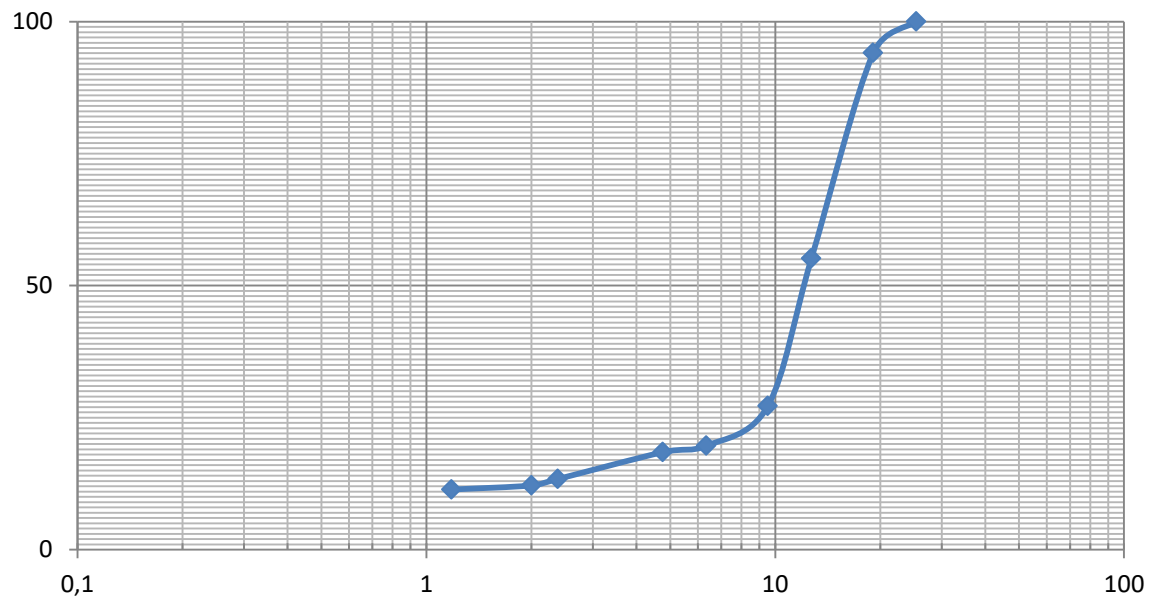


Figura 65 - Análise granulométrica do produto grande  
Fonte: Autoria própria.

A distribuição granulométrica do produto grande é apresentada na Figura 66.



Figura 66 - Distribuição granulométrica do produto grande  
Fonte: Autoria própria.

O  $d_{50}$  desse ensaio foi identificado em aproximadamente 12,1 mm, estando dentro dos limites preestabelecidos para um produto grande e próximo ao  $d_{50}$  médio dos testes com o mesmo parâmetro antes da automação do equipamento (teste 7,  $d_{50} = 11,79$  mm). A Figura 67 apresenta a comparação entre as curvas dos produtos dos testes com os mesmos parâmetros, antes e depois da automação do disco.

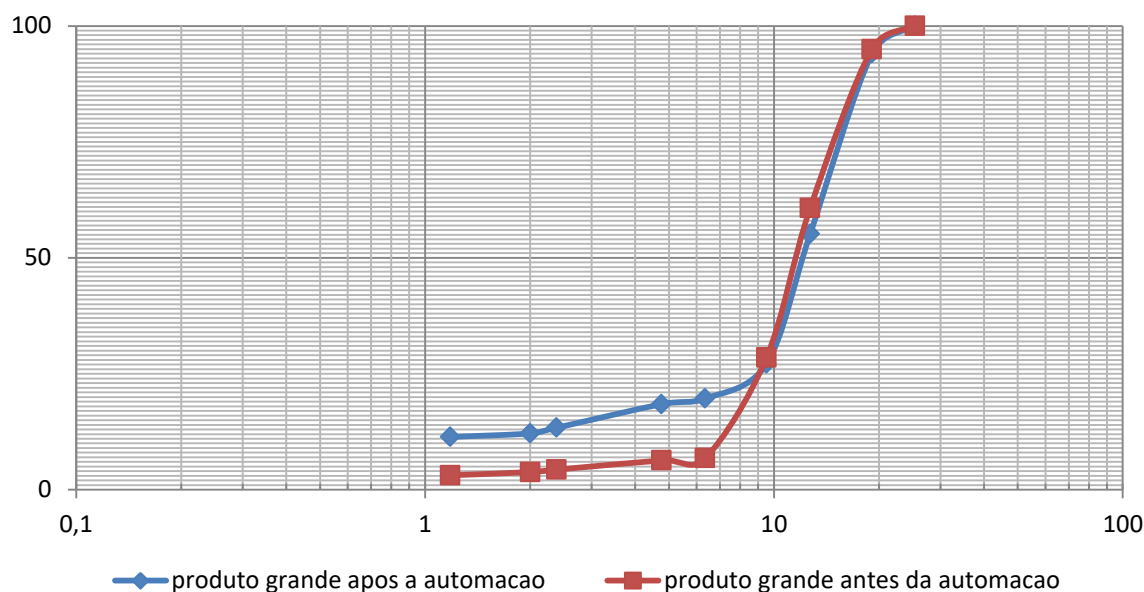


Figura 67 - Comparação da análise granulométrica do produto grande antes e depois da automação do equipamento  
Fonte: Autoria própria.

A Tabela 6 a seguir, exibe uma comparação entre o  $d_{50}$  obtido com o ajuste automatizado e aqueles obtidos com o ajuste manual dos parâmetros de pelotização.

Tabela 6 - Comparativo entre os resultados obtidos com o ajuste manual e automatizado dos parâmetros de pelotização

Tamanho do produto	$d_{50}$ testes manuais (mm)	$d_{50}$ testes automatizados (mm)	Diferença em %
P	2,89	3,00	3,7
M	8,57	7,67	11,7
G	12,10	11,79	2,63

Fonte: Autoria própria.

## CAPÍTULO 6

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir são apresentadas as considerações finais deste trabalho e as sugestões de trabalhos futuros.

#### 6.1 Considerações finais

O trabalho foi desenvolvido à partir da construção do aglomerador de partículas minerais, controlando a inclinação, a velocidade angular e a quantidade de água alimentada conforme proposto inicialmente. Além disso, foi verificada a viabilidade de programação do equipamento em malha aberta, visto que a mesma apresenta um menor custo e atendeu à demanda solicitada de geração de um produto com tamanho previamente definido.

Analisando as curvas comparativas entre os testes realizados antes e depois da automação do equipamento, percebeu-se uma aproximação significativa entre os pontos de  $d_{50}$  de ambas, sendo pequeno o percentual de diferença entre as curvas. Isso demonstra a funcionalidade do equipamento, bem como o alcance dos objetivos propostos, mostrando-se viável a construção do aglomerador da maneira como foi executado o projeto (com controle em malha aberta).

Foi verificado junto ao catálogo de fabricantes que não são oferecidos discos aglomeradores previamente programados para geração de um tamanho específico de produto, sendo o ajuste dos parâmetros feito de forma manual. Portanto, o equipamento desenvolvido apresenta a vantagem de entregar um produto com o tamanho requerido pelo operador conforme escolha em uma tecla da IHM, de acordo com uma programação previamente realizada.

Outro aspecto importante é o custo associado à elaboração do pelletizador. Enquanto nesse trabalho foram gastos aproximadamente R\$ 1.000,00, alguns fabricantes chegam a oferecer um equipamento de função similar, mas sem a programação, com custo superior a R\$ 42.000,00, na mesma escala. Assim, mostrou-se viável a construção do equipamento com controle em malha aberta, incentivando a pesquisa no setor de aglomeração.

Além dos aspectos já citados, foi percebida uma tendência na geração de produtos com granulometria reduzida ao utilizar os parâmetros de inclinação e quantidade de água de forma combinada nos maiores valores testados (50° e 17% respectivamente – teste 2, antes de se automatizar o equipamento). Já a geração dos maiores tamanhos de produtos obtidos na execução deste trabalho, se deu com a combinação dos parâmetros velocidade angular e quantidade de água nos maiores valores testados (20 rpm e 17% respectivamente – testes 5 e 7). Ressalta-se que não foi identificada nenhuma combinação de parâmetros específica para geração dos produtos médios (testes 1, 3, 4, 6 e 8) dentro dos intervalos testados neste trabalho.

Almeja-se, com a execução deste estudo, a colaboração e incentivo ao aumento da produtividade dos processos de aglomeração, especificamente da pelletização de calcário, contribuindo para uma melhor produção dos aglomerados.

## **6.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Sugere-se para próximos trabalhos, a variação de outros parâmetros como a posição dos raspadores e da alimentação de água, bem como a granulometria do produto alimentado. Além disso, pode ser conveniente a realização de ensaios com a utilização de aglomerantes para pelletização de calcário em diferentes dosagens, bem como o tratamento térmico dos aglomerados produzidos, permitindo a avaliação de sua resistência mecânica.

Sugere-se ainda a implantação do controle em malha fechada para comparação de custos e eficiência na pelletização em relação ao controle em malha aberta, bem como a análise das pelotas a partir de outras características físicas como resistência à compressão, resistência à queda e testes de absorção de água.

Torna-se interessante também a realização de testes com outro mineral, fazendo-se necessário o desenvolvimento de outra programação com os parâmetros adequados de geração dos três tamanhos de produto, visto que o trabalho desenvolvido foi voltado especificamente ao mineral calcário. Ressalta-se ainda que houve o controle da quantidade de água adicionada nos experimentos, acrescentada ao calcário seco (sem quantidade de água significativa que afetasse os testes), não sendo a umidade do produto um parâmetro medido nesse projeto.

## REFERÊNCIAS

AUGUSTO, Karen Soares. **Identificação automática do grau de maturação de pelotas de minério de ferro**. 2012. 183 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)- Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca\\_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=21365@1](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=21365@1)>. Acesso em: 06 set. 2018.

BAUMEISTER, Johann; LEITÃO, Antônio. **Introdução à teoria de controle e programação dinâmica**. [S. l.]: IMPA, 2008. Disponível em: <<https://impa.br/page-livros/introducao-a-teoria-de-controle-e-programacao-dinamica/>>. Acesso em: 31 jul. 2019.

BONEBERG, Bruna Steil. **Estudo, modelagem e simulação de atuadores elétricos**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. (Curso de Engenharia em Energia) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Novo Hamburgo, 2017. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/318258370\\_ESTUDO\\_MODELAGEM\\_E\\_SIMULACAO\\_DE\\_ATUADORES\\_ELETRICOS](https://www.researchgate.net/publication/318258370_ESTUDO_MODELAGEM_E_SIMULACAO_DE_ATUADORES_ELETRICOS)> . Acesso em: 30 jul. 2019.

BRASTORNO. **Disco pelotizador**. Disponível em: <<http://criacaodesite2ck.com.br/shopp-brastorno/produto/disco-pelotizador/>>. Acesso em: 02 set. 2017.

BUCCIOLI, Artur A. Bastos; ZORZAL, Ezequiel Roberto; KIRNER, Cláudio. **Usando realidade virtual e aumentada na visualização da simulação de sistemas de automação industrial**. 2016. 4 p. Projeto (Graduação em Ciência da Computação)- Centro Universitário Adventista de São Paulo, São Paulo, 2016.

CAMPOS, Antônio Rodrigues de; FONSECA, Vinícius Oliveira. Aglomeração: pelotização. In: LUZ, Adão Benvindo da; FRANÇA, Sílvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. **Tratamento de minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), 2018. cap. 15.2, p. 675 - 724.

CAPELLI, Alexandre. **Inversores de Frequência**. Mecatrônica Atual. Online, fev. 2002. Disponível em: <[http://w3.ufsm.br/fuentes/index\\_arquivos/Inversores.pdf](http://w3.ufsm.br/fuentes/index_arquivos/Inversores.pdf)>. Acesso em: 29 jul. 2019.

CÔRTEZ, Douglas Machado. **Aplicação de Inversores de Frequência em Motores Elétricos de CA**. 2010. Projeto de Graduação (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2010.

DK. **Sintering plant**. Disponível em: <<https://www.dk-duisburg.de/en/prozess/sinteranlage.html>> . Acesso em: 26 ago. 2017.

ENGENDRAR. **Catálogo técnico: disco pelletizador**. Disponível em: <[http://www.engendrar.com.br/site/\\_catalogos/30.pdf](http://www.engendrar.com.br/site/_catalogos/30.pdf)>. Acesso em: 02 set. 2017.

EXAME. **Vale prioriza minério de qualidade para driblar preços em queda**. 2018. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/negocios/vale-prioriza-minerio-de-qualidade-para-driblar-precos-em-queda/>>. Acesso em: 24 ago. 2019.

FEECO INTERNATIONAL. **The Limestone processing handbook**. Disponível em: <<http://go.feeco.com/acton/media/12345/limestone-processing-handbook#>>. Acesso em: 03 ago. 2018.

FONSECA, Maurício Cota. **Influência da distribuição granulométrica do pellet feed no processo de aglomeração e na qualidade da pelota de minério de ferro para redução direta**. 2004. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)- Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

GARCIA, Eloisa Angélica Silva; SILVA, André Carlos; SILVA, Elenice Maria Schons; BARROS, Mariana Rezende. **Pelotização de finos de calcário utilizando água e cal virgem como agentes aglomerantes**. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, XXVI., 2015, Poços de Caldas. p. 1-9.

GOEKING, Weruska. Da máquina a vapor aos softwares de automação. **O Setor Elétrico**, São Paulo, p. 70-77, maio. 2010. Disponível em: <<https://www.osetoelettrico.com.br/damaquina-a-vapor-aos-softwares-de-automacao/>> . Acesso em: 18 jan. 2018.

INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE. **Instrumentação Industrial**. 2019. Disponível em <<https://instrumentacaoecontrole.com.br/instrumentacao-industrial-guia-completo/>>. Acesso em: 24 set. 2019.

KALATEC. **Um pouco sobre o atuador elétrico linear**. Kalatec Automação Industrial. Online. 20---. Disponível em: <<https://www.kalatec.com.br/um-pouco-sobre-o-atuador-eletrico-linear-kalatec/>>. Acesso em: 31 jul. 2019

MAIA, Eduardo Silva. **Pelotização e redução de concentrado magnetítico**. 2011. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos)- Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MARTINEZ, Luciana; FILHO, Secundino Soares. **Comparação entre soluções malha aberta e malha fechada no planejamento energético de sistemas de energia elétrica**. In: XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2001,

Campinas. Grupo de Estudo de Operação de Sistemas Elétricos. Campinas: [s.n.], out. 2001.

MARTINS, Gabriela Cristina Paiva. **Modelagem e Simulação de um Atuador Elétrico Linear**. 2016. Projeto de Graduação - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/29781/29781.PDF>> Acesso em: 30 jul. 2019.

MARTINS, J. Procedimentos para avaliação de aglomerantes na pelotização. In: XXII ENTMME e VII MSHMT, 2007, Ouro Preto. **Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa e do Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology**. Ouro Preto: 2007. p. 499-502.

METSO. **Pelotização de minério de Ferro**. Disponível em: <<https://www.metso.com/br/produtos/pelotizacao-de-minerio-de-ferro/>> . Acesso em: 30 nov. 2018.

MORAES, Sandra Lucia de. **Contribuição ao entendimento do efeito de agente coloidisante no processo de pelotização de concentrado de minério de ferro**. 2014. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

MOURÃO, José Murilo. **Aspectos conceituais relativos à pelotização de minérios de ferro**. Vitória: Conceitual consultoria mínero-siderúrgica. 2017. 244f, cap 2. Disponível em: <<https://www.abmbrasil.com.br/download/file/aspectos-conceituais-relativos-a-pelotizacao-de-minerio-de-ferro>>. Acesso em: 29 nov. 2018.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5.ed. São Paulo: Pearson, 2010. 822p.

PORTAL FATOR BRASIL. **Vale, BNDES e Logos Tecno com desenvolvem tecnologia inédita para produção de ferro-gusa no Brasil**. [S.I.]: Portal Fator Brasil, 2011. Disponível em: <[http://www.revistafatorbrasil.com.br/ver\\_noticia.php?not=174020](http://www.revistafatorbrasil.com.br/ver_noticia.php?not=174020)>. Acesso em: 26 ago. 2017.

ROGESESI. **Catálogo de produtos: Disco granulador**. Disponível em: <<http://www.rogesesi.com.br/catalogo/31/Disco-Granulador>>. Acesso em: 02 set. 2017.

SANTANA, Rafael. **C&I - Tabelas Técnicas**. AI&CP: Automação, Instrumentação e Controle. 2012. Disponível em <<https://aihcp.wordpress.com/author/batanguera/>>. Acesso em: 24 set. 2019.

SILVEIRA, Evanildo da. Pelotas para exportação: Empresa inova no sistema produtivo de aglomerados de minério de ferro. **Pesquisa Fapesp**, [S.I.], v. 220, jun. 2014. Disponível em:

<<http://revistapesquisa.fapesp.br/2014/06/16/pelotas-para-exportacao/>>. Acesso em: 06 set. 2018.

SILVEIRA, Leonardo; LIMA, Weldson Q. **Um breve histórico conceitual da automação industrial e redes para automação industrial**. 2003. 3 p. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica)- Campus Lagoa Nova, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP. **Processos de aglomeração de minérios**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 20---. Disponível em <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/83761/mod\\_resource/content/1/aglomera%2B%C2%BA%2B%C3%BAo%202013.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/83761/mod_resource/content/1/aglomera%2B%C2%BA%2B%C3%BAo%202013.pdf)> . Acesso em: 25 de set. 2019.

USIMINAS. **Produtos:** Mineração Usiminas. 2018. Disponível em: <<http://www.usiminas.com/mineracao/produtos/>>. Acesso em: 06 set. 2018.

VALE, Julia Maria de Carvalho. **Estratégias de controle no processamento de minério de ferro**. 2014. 45 p. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais)- Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2014.

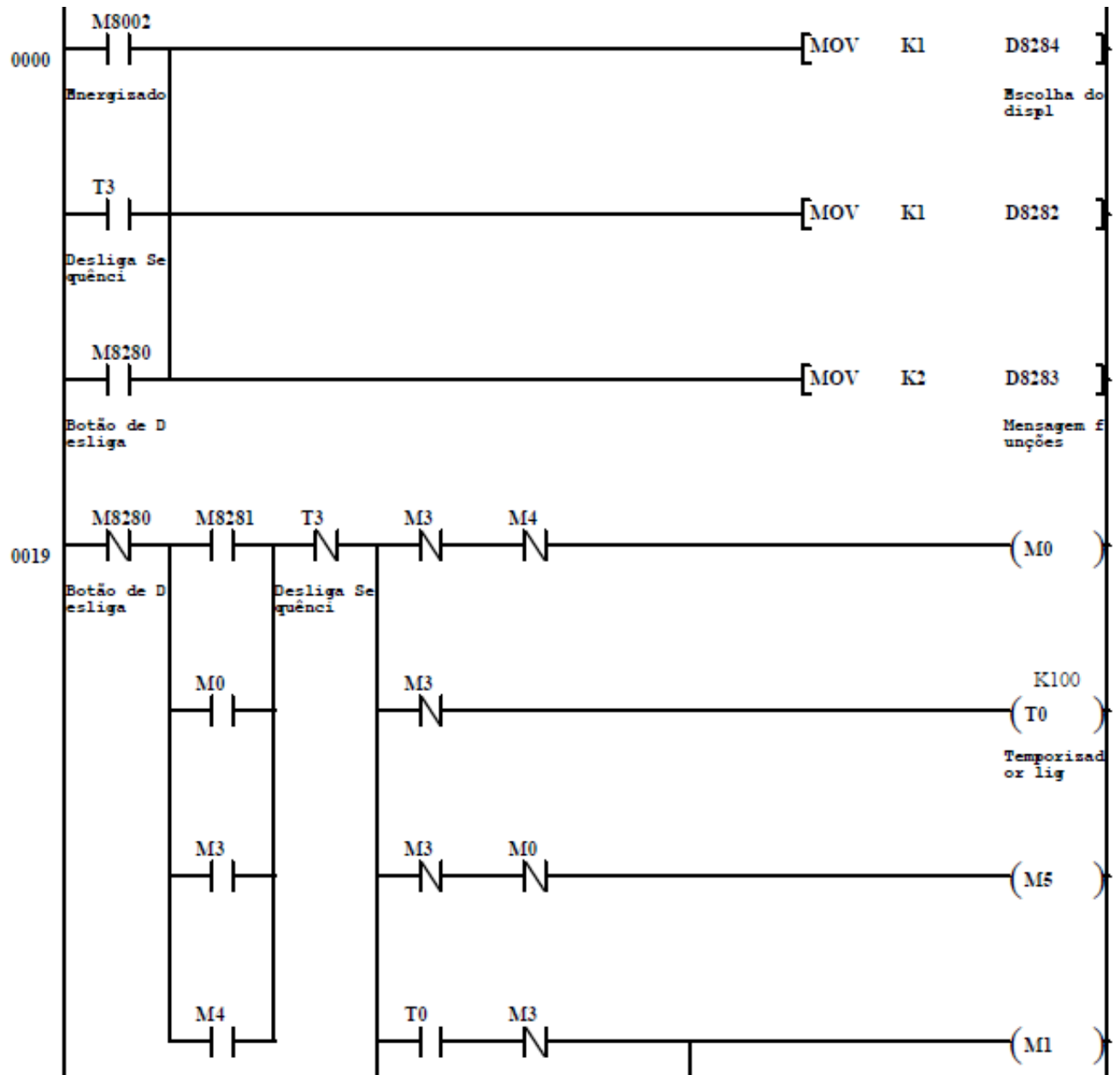
VEVERKA, Jim; HINKLE, Robert. Comparison of liquid binders for limestone pelletizing. In: Biennial Conference, 27th., 2001, Providence. **Institute for Briquetting and Agglomeration...** [S.l.: s.n.], 2001. p. 1-12. Disponível em: <<https://www.marsmineral.com/pdf/BindersForLimestone.pdf>>. Acesso em: 14 ago. 2018.

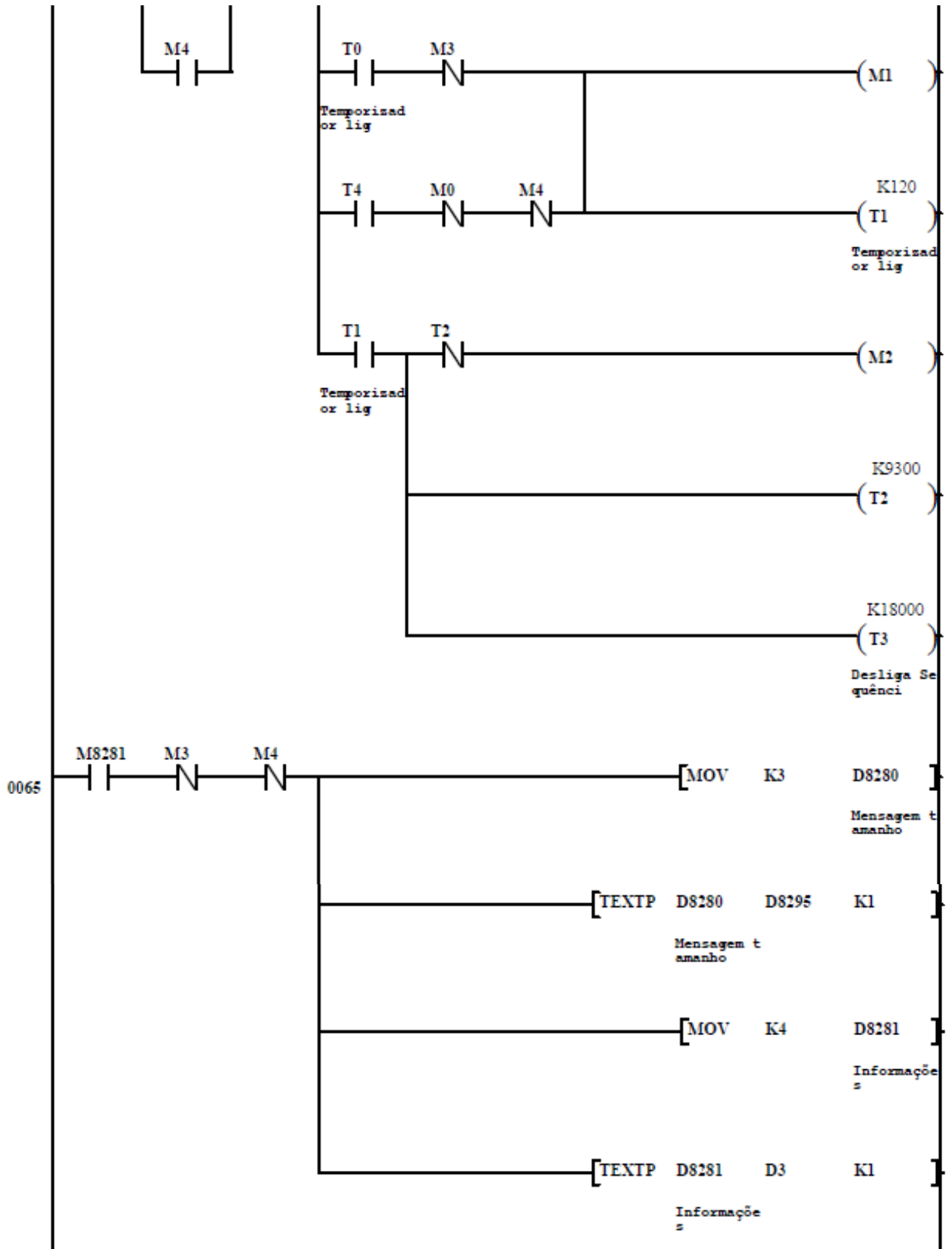
WEG. **Motores Elétricos**. Jaraguá do Sul: WEG, 2005 a. 145 p.

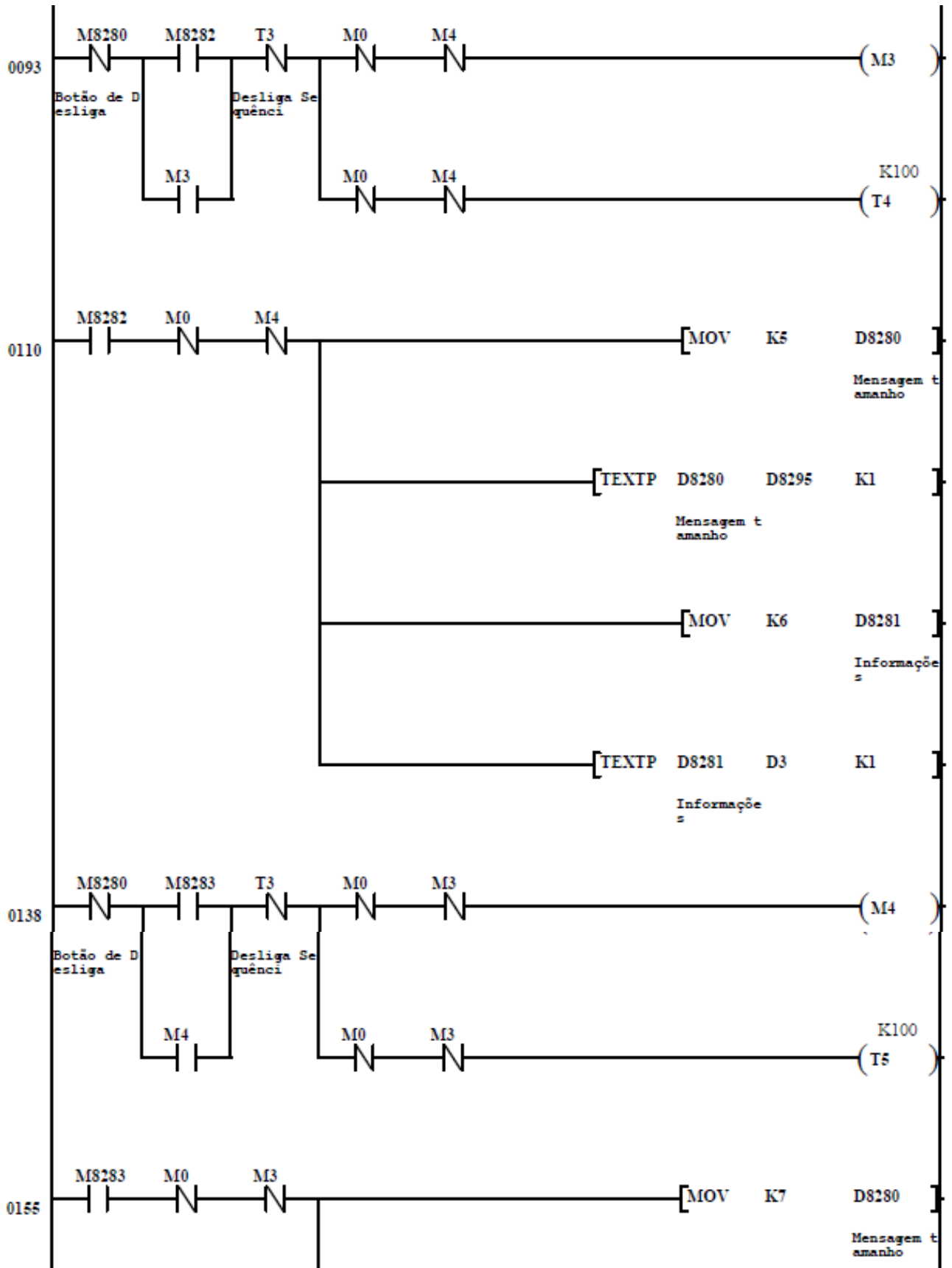
WEG. **Guia de aplicação de inversores de frequência**. 3. ed. Jaraguá do Sul: WEG, 2005 b. 267 p.

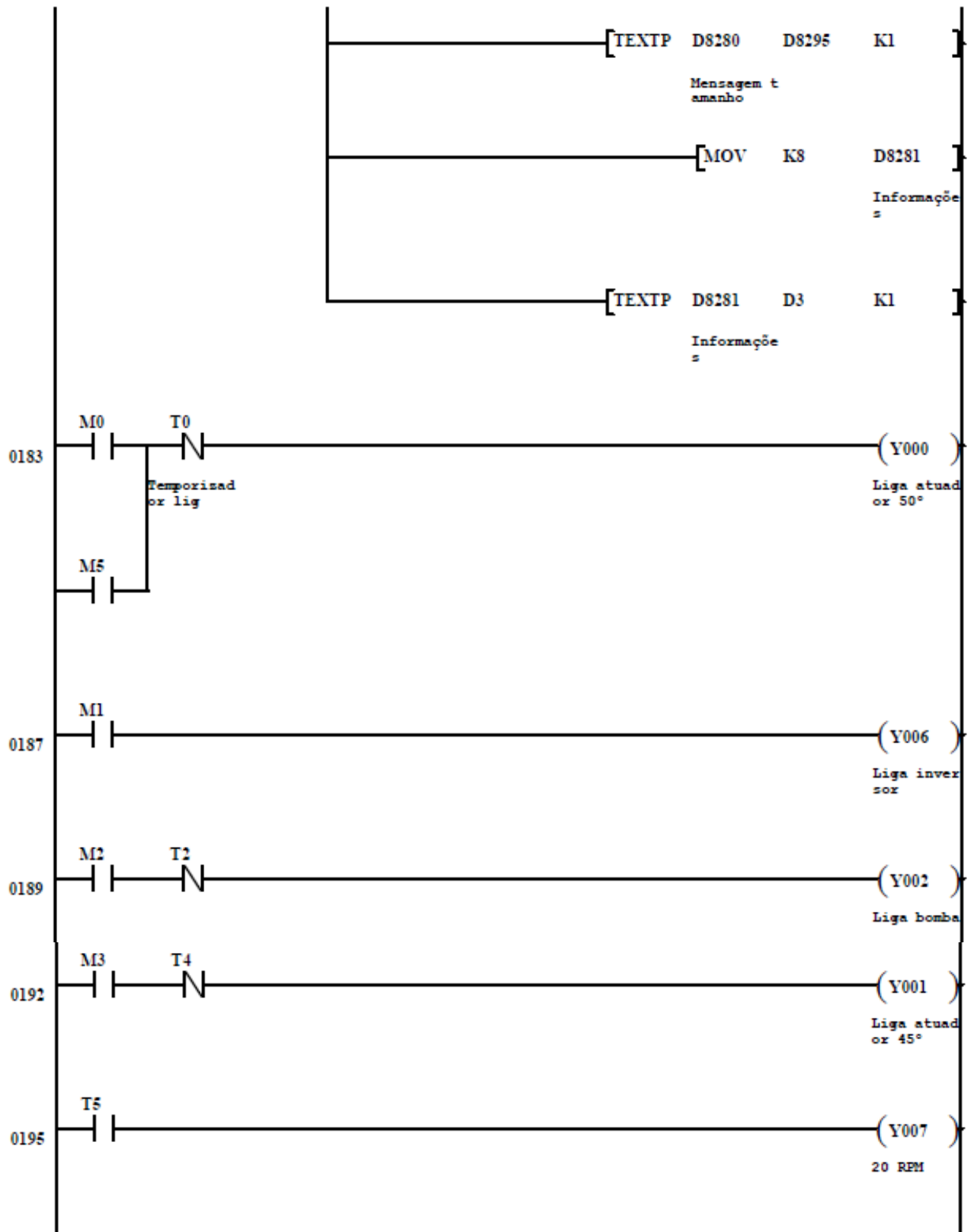
## APÊNDICE A

### Programação desenvolvida







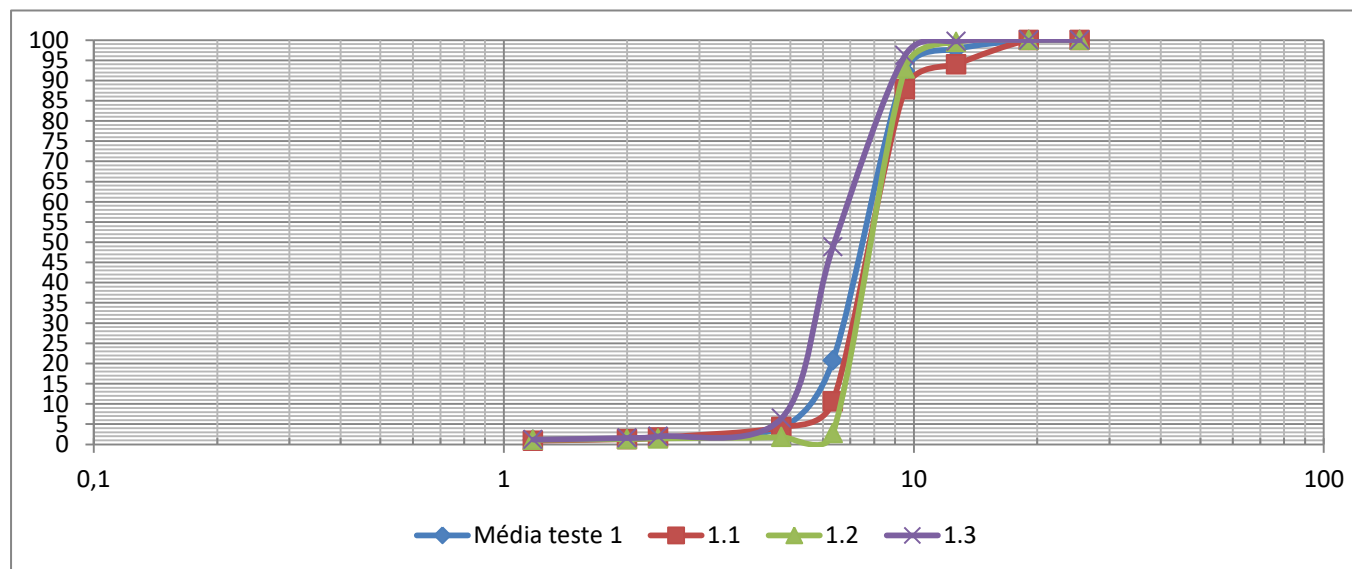


## **APÊNDICE B**

### **Repetições dos testes com o ajuste manual dos parâmetros de aglomeração**

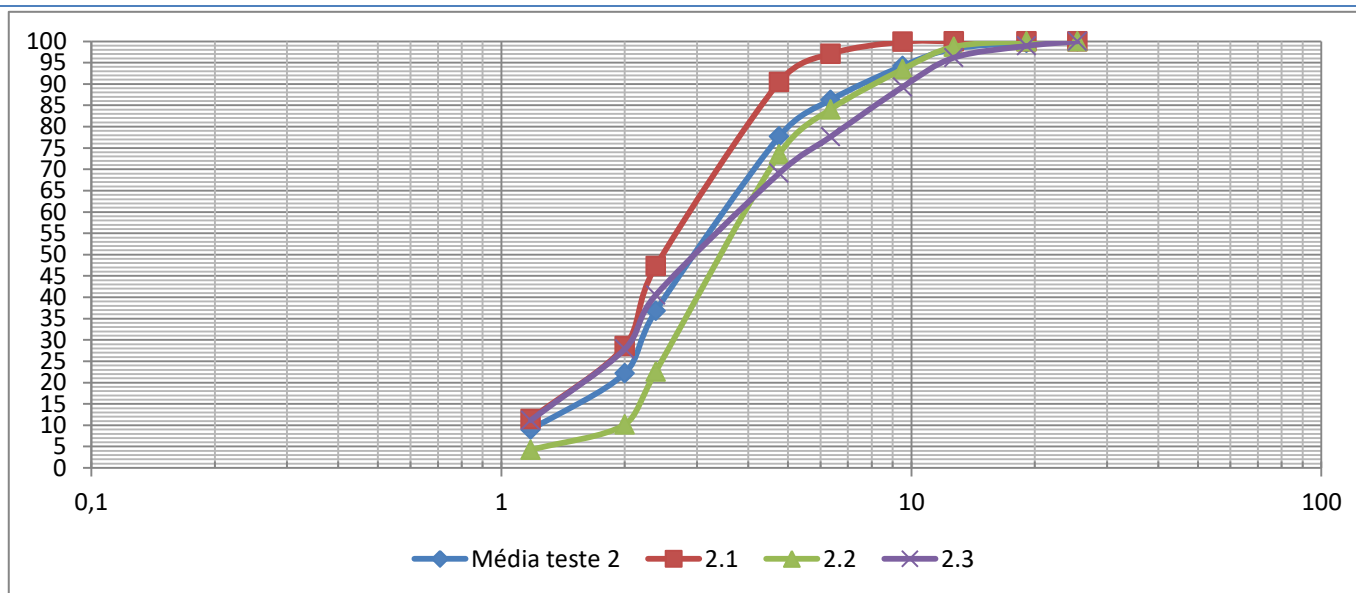
## % PASSANTE ACUMULADO

#	Φ peneira (mm)	1.1	1.2	1.3	MÉDIA TESTE 1	DESVIO PADRÃO
1"	25,4	100	100	100	100	0
3/4"	19,1	100	100	100	100	0
1/2"	12,7	93,99239544	99,51060359	99,70617042	97,73638982	3,243868374
3/8"	9,52	87,83269962	92,98531811	96,18021548	92,3327444	4,211845744
1/4"	6,35	10,64638783	2,77324633	48,87365328	20,76442915	24,65954076
4	4,76	4,258555133	1,794453507	6,464250735	4,172419792	2,336089897
8	2,38	1,673003802	1,468189233	1,958863859	1,700018965	0,246450322
10	2	1,292775665	1,305057096	1,567091087	1,38830795	0,154952464
26	1,18	0,912547529	1,141924959	1,175318315	1,076596934	0,143048715
Fundo		0	0	0	0	0



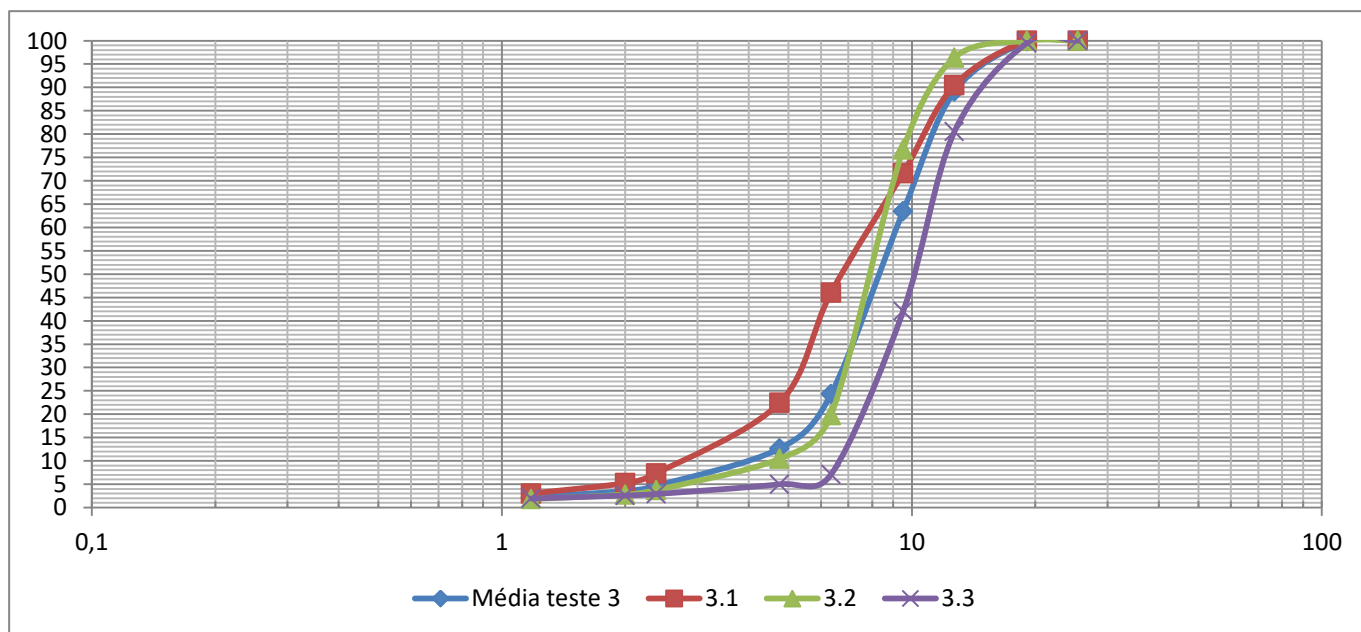
## % PASSANTE ACUMULADO

#	Φ peneira (mm)	2.1	2.2	2.3	MÉDIA TESTE 2	DESVIO PADRÃO
1"	25,4	100	100	100	100	0
3/4"	19,1	100	100	98,9205103	99,6401701	0,623243666
1/2"	12,7	100	98,70689655	96,17271835	98,29320497	1,946888993
3/8"	9,52	99,89177489	93,44827586	89,30323847	94,21442974	5,335683622
1/4"	6,35	97,07792208	84,05172414	77,62512267	86,25158963	9,911226329
4	4,76	90,47619048	73,53448276	69,08734053	77,69933792	11,28628546
8	2,38	47,29437229	22,5862069	40,52993131	36,8035035	12,76863569
10	2	28,57142857	10,17241379	27,87046124	22,20476787	10,42621682
26	1,18	11,47186147	4,224137931	11,18743867	8,961146023	4,104833532
Fundo		0	0	0	0	0



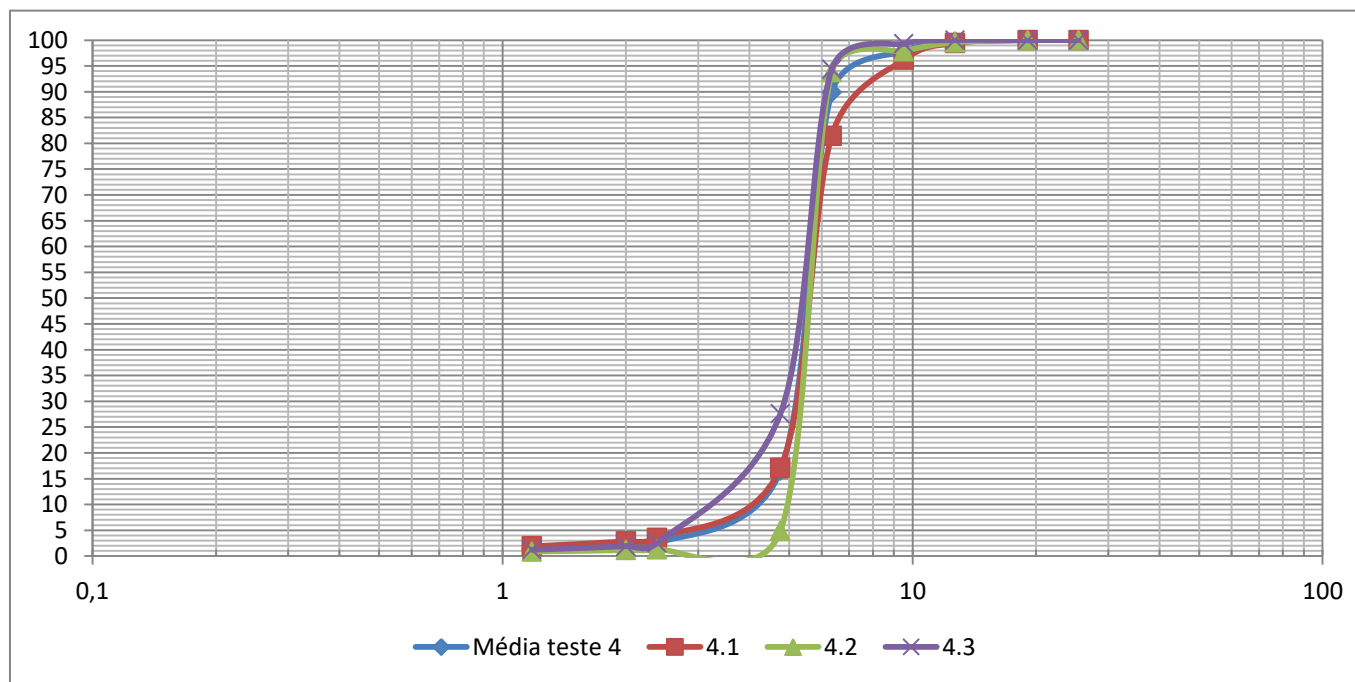
## % PASSANTE ACUMULADO

#	Φ peneira (mm)	3.1	3.2	3.3	MÉDIA TESTE 3	DESVIO PADRÃO
1"	25,4	100	100	100	100	0
3/4"	19,1	100	100	99,51690821	99,8389694	0,278913174
1/2"	12,7	90,45751634	96,37377964	80,51529791	89,11553129	8,01395992
3/8"	9,52	71,63398693	76,70850767	42,02898551	63,45716004	18,72999434
1/4"	6,35	46,0130719	19,80474198	7,085346216	24,30105336	19,84954832
4	4,76	22,48366013	10,46025105	4,99194847	12,64528655	8,948227719
8	2,38	7,320261438	3,765690377	2,898550725	4,661500846	2,343019143
10	2	5,22875817	2,789400279	2,576489533	3,531549327	1,473676063
26	1,18	3,006535948	1,813110181	1,93236715	2,250671093	0,657308387
Fundo		0	0	0	0	0



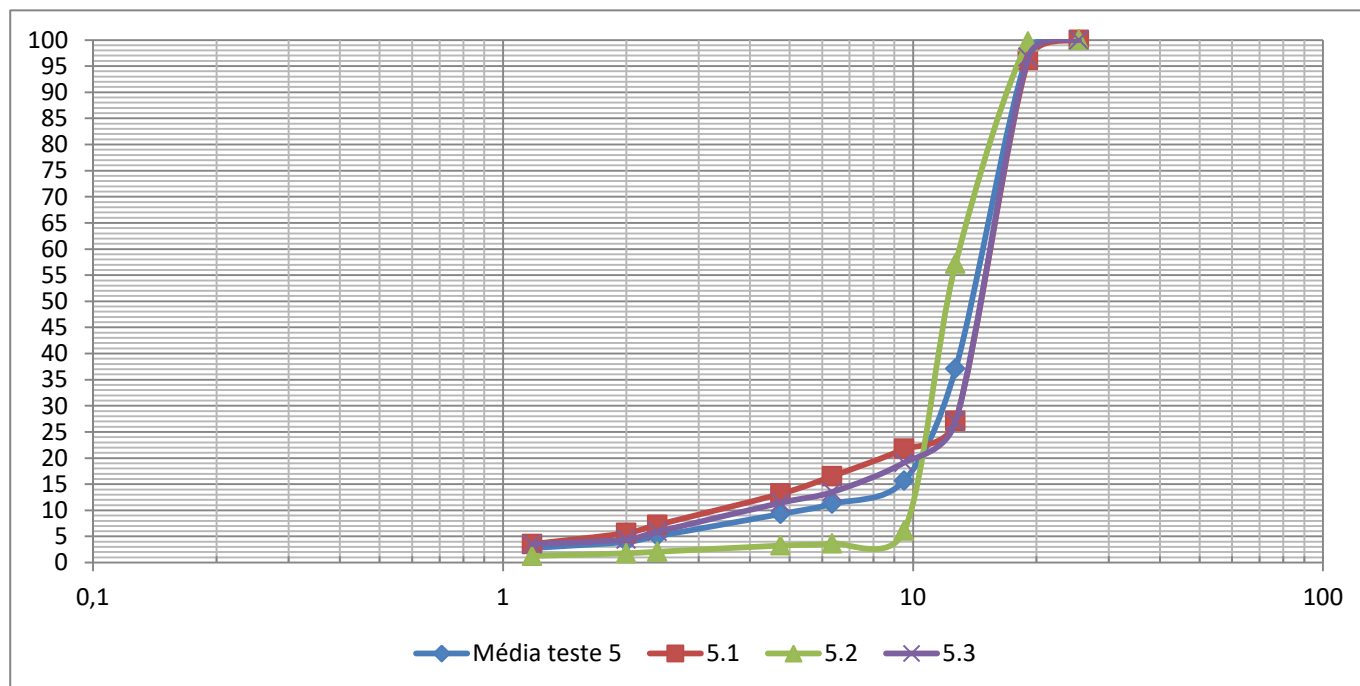
## % PASSANTE ACUMULADO

#	Φ peneira (mm)	4.1	4.2	4.3	MÉDIA TESTE 4	DESVIO PADRÃO
1"	25,4	100	100	100	100	0
3/4"	19,1	100	100	100	100	0
1/2"	12,7	99,42965779	99,56896552	100	99,66620777	0,297345926
3/8"	9,52	96,19771863	97,84482759	99,29221436	97,77825353	1,548321682
1/4"	6,35	81,46387833	93,82183908	94,33771486	89,87447742	7,288358171
4	4,76	17,11026616	4,885057471	27,60364004	16,53298789	11,37028743
8	2,38	3,517110266	1,293103448	2,527805865	2,446006526	1,114257569
10	2	2,851711027	1,149425287	1,921132457	1,97408959	0,852377574
26	1,18	1,901140684	0,862068966	1,213346815	1,325518822	0,528539903
Fundo		0	0	0	0	0



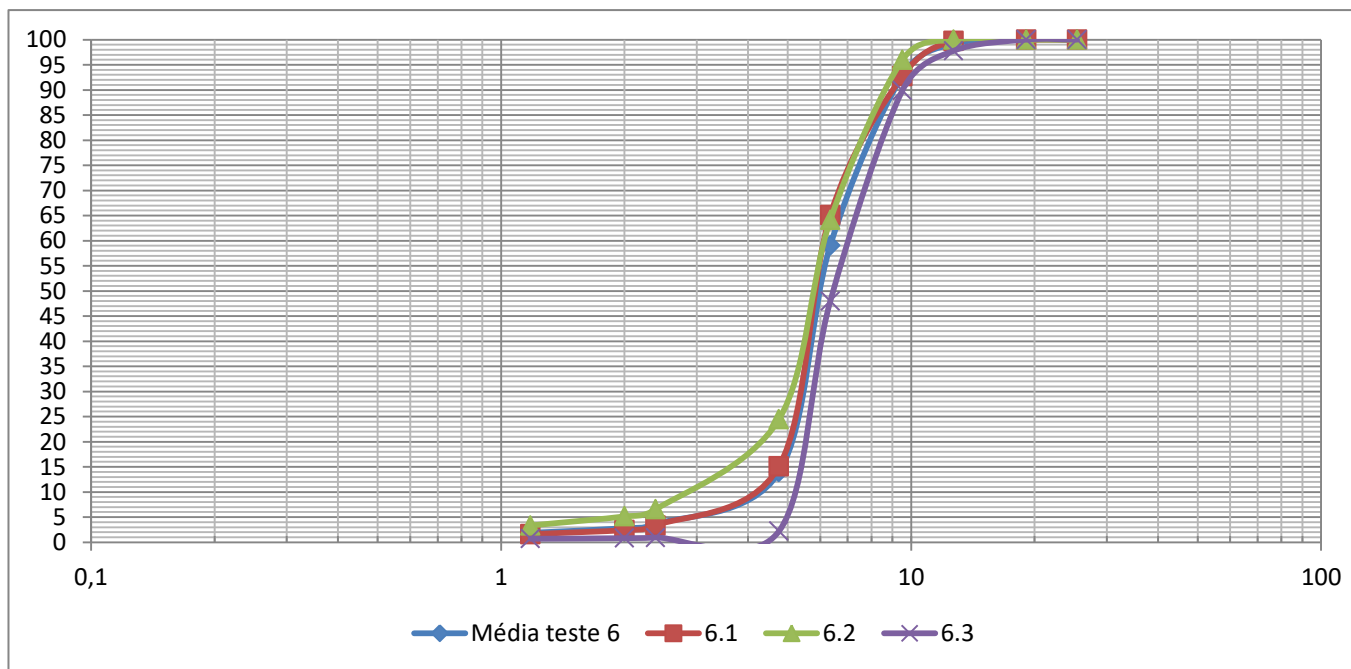
## % PASSANTE ACUMULADO

#	Φ peneira (mm)	5.1	5.2	5.3	MÉDIA TESTE 5	DESVIO PADRÃO
1"	25,4	100	100	100	100	0
3/4"	19,1	96,12970711	99,70355731	96,71201814	97,51509419	1,917498283
1/2"	12,7	27,09205021	57,21343874	26,98412698	37,09653864	17,42183009
3/8"	9,52	21,75732218	6,126482213	19,16099773	15,68160071	8,376183034
1/4"	6,35	16,52719665	3,656126482	13,49206349	11,22512888	6,728324922
4	4,76	13,17991632	3,260869565	11,45124717	9,29734435	5,298711648
8	2,38	7,217573222	2,075098814	5,89569161	5,062787882	2,670497561
10	2	5,648535565	1,778656126	4,421768707	3,949653466	1,977665623
26	1,18	3,556485356	1,28458498	3,514739229	2,785269855	1,299798832
Fundo		0	0	0	0	0



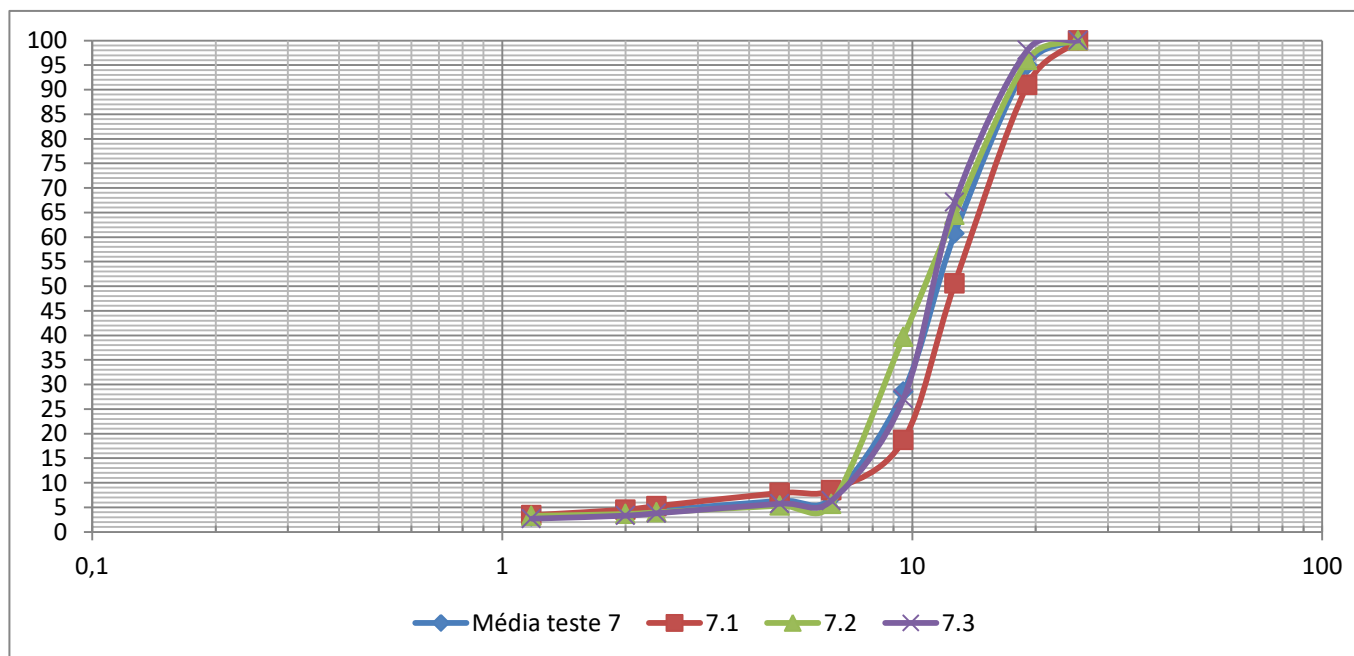
% PASSANTE ACUMULADO

#	Φ peneira (mm)	6.1	6.2	6.3	MÉDIA TESTE 6	DESVIO PADRÃO
1"	25,4	100	100	100	100	0
3/4"	19,1	100	100	100	100	0
1/2"	12,7	99,76958525	100	97,79326365	99,1876163	1,213028124
3/8"	9,52	92,74193548	95,96662031	89,89547038	92,86800872	3,03753785
1/4"	6,35	65,0921659	64,11682893	47,96747967	59,05882483	9,617758244
4	4,76	15,0921659	24,47844228	2,206736353	13,92578151	11,18157237
8	2,38	3,341013825	6,536856745	0,929152149	3,602340906	2,812971133
10	2	2,419354839	5,146036161	0,81300813	2,79279971	2,190520209
26	1,18	1,612903226	3,337969402	0,696864111	1,882578913	1,341045496
Fundo		0	0	0	0	0

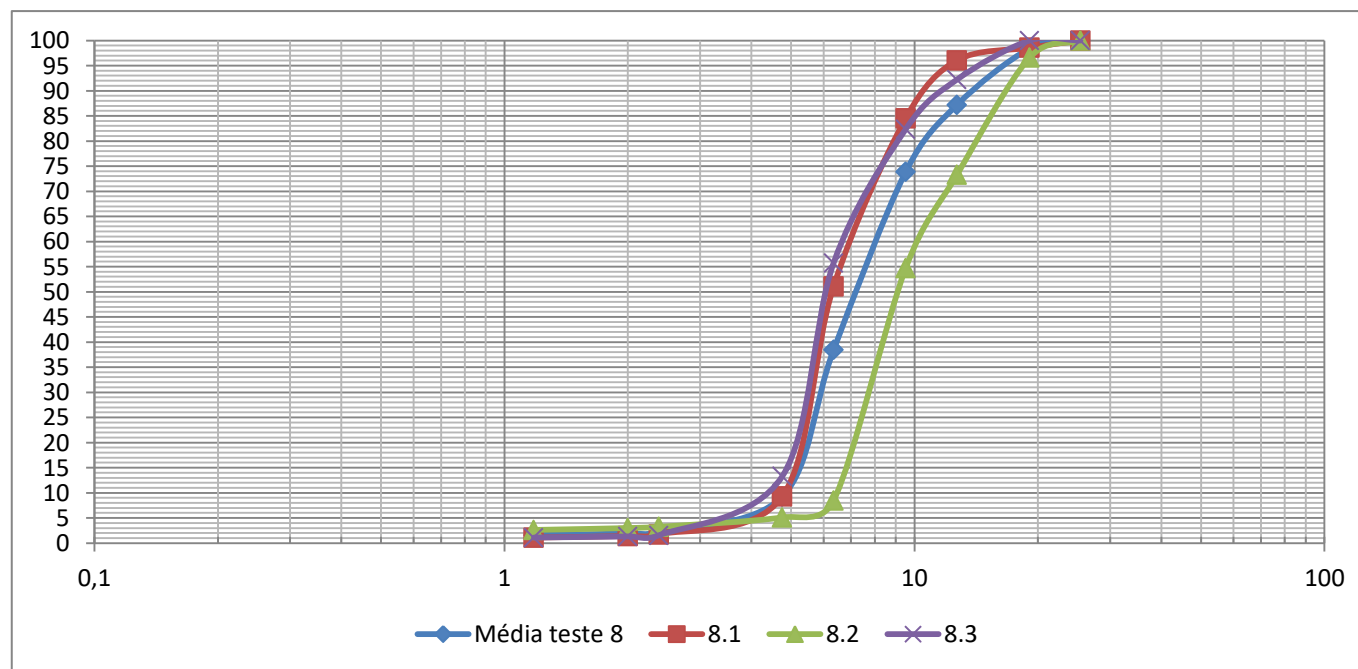


% PASSANTE ACUMULADO

#	Φ peneira (mm)	7.1	7.2	7.3	MÉDIA TESTE 7	DESVIO PADRÃO
1"	25,4	100	100	100	100	0
3/4"	19,1	90,93484419	96,00484262	98,04400978	94,99456553	3,66067667
1/2"	12,7	50,56657224	64,52784504	67,11491443	60,7364439	8,901850887
3/8"	9,52	18,69688385	39,7094431	27,1393643	28,51523042	10,57363075
1/4"	6,35	8,498583569	5,690072639	6,356968215	6,848541475	1,467367239
4	4,76	7,932011331	5,326876513	5,745721271	6,334869705	1,398929506
8	2,38	5,240793201	3,995157385	3,789731051	4,341893879	0,785216523
10	2	4,532577904	3,631961259	3,300733496	3,821757553	0,637477165
26	1,18	3,399433428	3,268765133	2,689486553	3,119228371	0,377858537
Fundo		0	0	0	0	0



#	Φ peneira (mm)	% PASSANTE ACUMULADO			MÉDIA TESTE 8	DESVIO PADRÃO
		8.1	8.2	8.3		
1"	25,4	100	100	100	100	0
3/4"	19,1	98,58044164	96,63341646	100	98,40461937	1,690164575
1/2"	12,7	96,05678233	73,31670823	92,23946785	87,20431947	12,17753185
3/8"	9,52	84,54258675	54,73815461	82,37250554	73,88441564	16,61661206
1/4"	6,35	51,10410095	8,478802993	55,76496674	38,44929023	26,05961428
4	4,76	9,305993691	5,112219451	13,3037694	9,240660848	4,09616576
8	2,38	1,735015773	3,241895262	1,55210643	2,176339155	0,927319427
10	2	1,41955836	2,992518703	1,33037694	1,914151334	0,934957469
26	1,18	1,104100946	2,618453865	1,10864745	1,610400754	0,873002563
Fundo		0	0	0	0	0

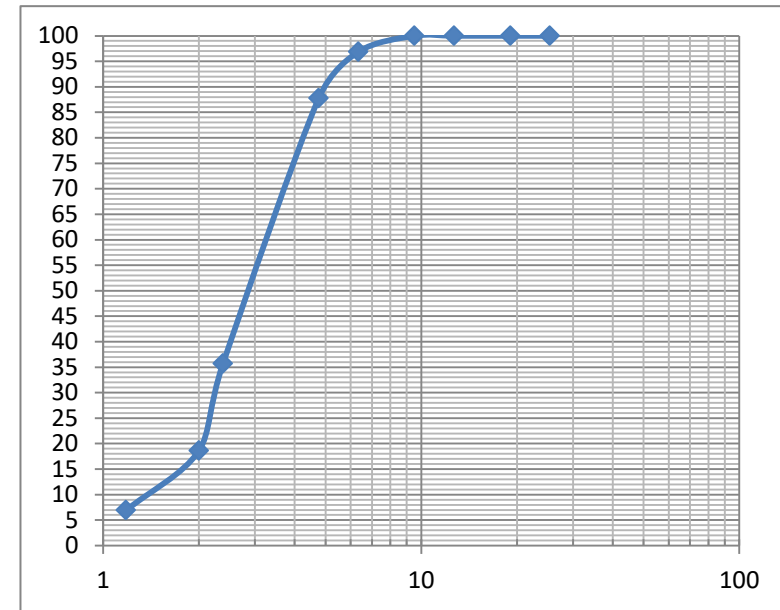


## **APÊNDICE C**

### **Resultados dos testes com ajuste automatizado dos parâmetros de aglomeração**

teste	H2O	Inc	Vel. Ang.
P	17%	50°	10 rpm

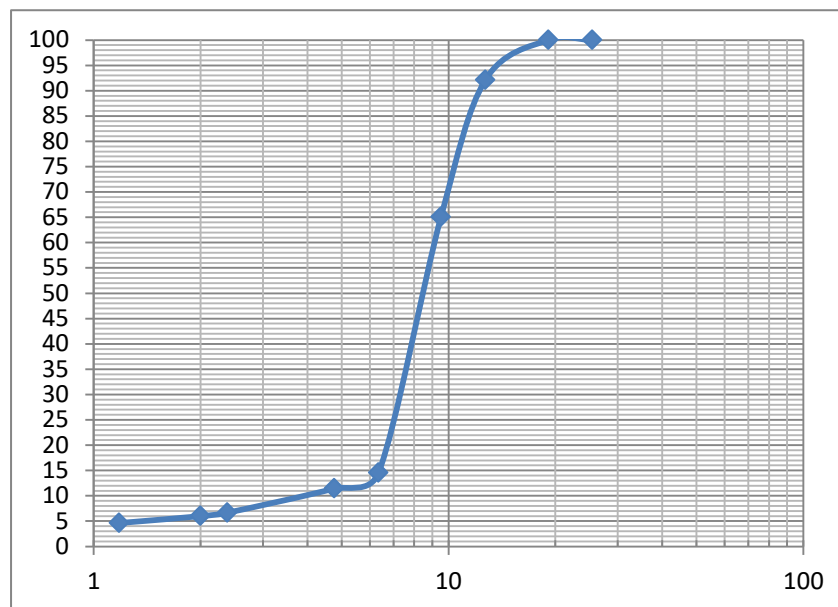
Abert. Peneira (mm)	Amostra 1 (g)		Amostra 2 (g)		média
	442		480		
25,4	0	0	0	0	0
19,1	0	0	0	0	0
12,7	0	0	0	0	0
9,52	0	0	0	0	0
6,35	18	10	14	14	14
4,76	51	31	41	41	41
2,38	235	232	233,5	233,5	233,5
2	65	88	76,5	76,5	76,5
1,18	39	66	52,5	52,5	52,5
Fundo 2	20	42	31	31	31



#	Φ peneira (mm)	massa retirada (g)	% retida em cada peneira	% retida acumulada	% que passa em cada peneira
1"	25,4	0	0	0	100
3/4"	19,1	0	0	0	100
1/2"	12,7	0	0	0	100
3/8"	9,52	0	0	0	100
1/4"	6,35	14	3,121516165	3,121516165	96,87848384
4	4,76	41	9,141583055	12,26309922	87,73690078
8	2,38	233,5	52,06243032	64,32552954	35,67447046
10	2	76,5	17,05685619	81,38238573	18,61761427
26	1,18	52,5	11,70568562	93,08807135	6,911928651
	Fundo	31	6,911928651	100	0
	Σ	448,5	100		

teste	H2O	Inc	Vel. Ang.
M	17%	45°	10 rpm

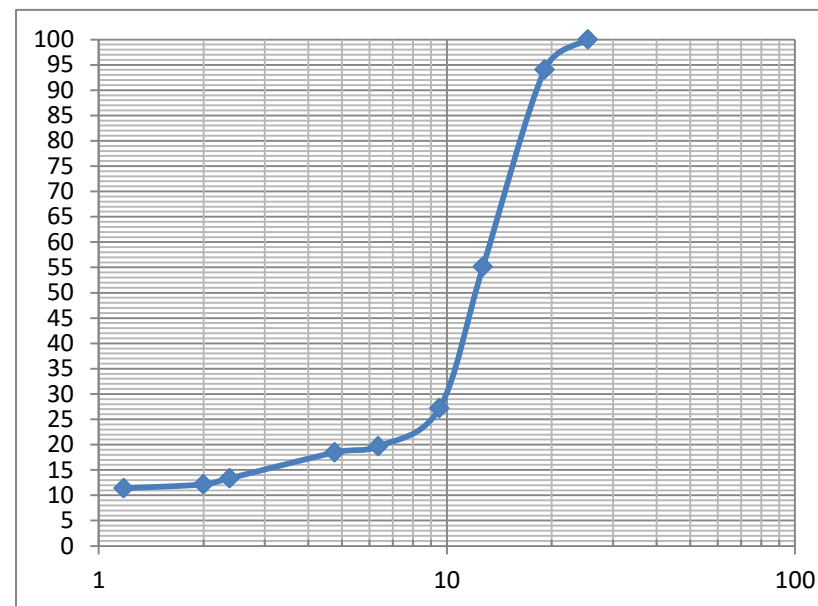
Abert. Peneira (mm)	Amostra (g)		média
	Amostra 1 (g)	Amostra 2 (g)	
	394	359	376,5
25,4	0	0	0
19,1	0	0	0
12,7	21	37	29
9,52	106	93	99,5
6,35	199	172	185,5
4,76	13	10	11,5
2,38	21	14	17,5
2	2	3	2,5
1,18	9	1	5
Fundo 2	18	16	17



#	Φ peneira (mm)	massa retirada		% retida em cada peneira	% retida acumulada	% que passa em cada peneira
		(g)				
1"	25,4	0		0	0	100
3/4"	19,1	0		0	0	100
1/2"	12,7	29		7,891156463	7,891156463	92,10884354
3/8"	9,52	99,5		27,07482993	34,96598639	65,03401361
1/4"	6,35	185,5		50,47619048	85,44217687	14,55782313
4	4,76	11,5		3,129251701	88,57142857	11,42857143
8	2,38	17,5		4,761904762	93,33333333	6,66666667
10	2	2,5		0,680272109	94,01360544	5,986394558
26	1,18	5		1,360544218	95,37414966	4,62585034
	Fundo	17		4,62585034	100	0
	Σ	367,5		100		

teste	H2O	Inc	Vel. Ang.
G	17%	50°	20 rpm

Abert. Peneira (mm)	Amostra 1 (g)	Amostra 2 (g)	média
	471	453	462
25,4	0	0	0
19,1	20	34	27
12,7	181	171	176
9,52	133	120	126,5
6,35	33	35	34
4,76	8	3	5,5
2,38	28	18	23
2	5	6	5,5
1,18	4	3	3,5
Fundo 2	49	54	51,5



#	Φ peneira (mm)	massa retirada (g)	% retida em cada peneira	% retida acumulada	% que passa em cada peneira
1"	25,4	0	0	0	100
3/4"	19,1	27	5,966850829	5,966850829	94,03314917
1/2"	12,7	176	38,89502762	44,86187845	55,13812155
3/8"	9,52	126,5	27,9558011	72,81767956	27,18232044
1/4"	6,35	34	7,513812155	80,33149171	19,66850829
4	4,76	5,5	1,215469613	81,54696133	18,45303867
8	2,38	23	5,082872928	86,62983425	13,37016575
10	2	5,5	1,215469613	87,84530387	12,15469613
26	1,18	3,5	0,773480663	88,61878453	11,38121547
	Fundo	51,5	11,38121547	100	0
	Σ	452,5	100		