



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ – UFOPA
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE JURUTI - CJUR
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MINAS**

CRISTIANA CARLA SANTARÉM DE CARVALHO

**SECAGEM *SPEED* EM AMOSTRAS DE BAUXITA: COMPARATIVO ENTRE
DIFERENTES MÉTODOS DE SECAGEM EM INCREMENTOS DE CONTROLE DE
PROCESSO**

**JURUTI-PA
2022**

CRISTIANA CARLA SANTARÉM DE CARVALHO

**SECAGEM *SPEED* EM AMOSTRAS DE BAUXITA: COMPARATIVO ENTRE
DIFERENTES MÉTODOS DE SECAGEM EM INCREMENTOS DE CONTROLE DE
PROCESSO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas, no Campus Universitário de Juruti, na Universidade Federal do Oeste do Pará.

Orientador: Prof. Msc. Michael José Batista Santos.

**JURUTI-PA
2022**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFOPA

C331s Carvalho, Cristiana Carla Santarém de
Secagem speed em amostras de bauxita: comparativo entre diferentes métodos de secagem em incrementos de controle de processo / Cristiana Carla Santarém de Carvalho – Juruti, 2022.
52 p.: il.
Inclui bibliografias.

Orientador: Michael José Batista Santos,
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Universitário de Juruti, Curso de Bacharelado em Engenharia de Minas.

1. Secagem de minério. 2. Amostragem. 3. Secagem de minério. I. Santos, Michael José Batista, *orient.* II. Título.

CDD: 23.ed. 549.7

Bibliotecária-Documentalista: Maria de Nazaré Eleutério de Brito – CRB2/1244

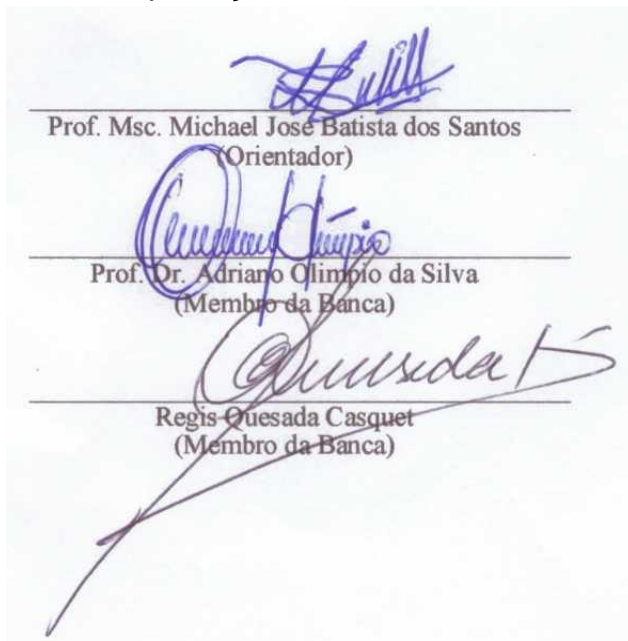
CRISTIANA CARLA SANTARÉM DE CARVALHO

**SECAGEM *SPEED* EM AMOSTRAS DE BAUXITA: COMPARATIVO ENTRE
DIFERENTES MÉTODOS DE SECAGEM EM INCREMENTOS DE CONTROLE DE
PROCESSO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas, no Campus Universitário de Juruti, na Universidade Federal do Oeste do Pará.

Nota: 9,5

Data de Aprovação: 16 de dezembro de 2022



Prof. Msc. Michael José Batista dos Santos
(Orientador)

Prof. Dr. Adriano Olímpio da Silva
(Membro da Banca)

Regis Quesada Casquet
(Membro da Banca)

Dedico este trabalho a Deus, a minha família, aos meus amigos, aos meus professores e aos meus mentores, pois sem o apoio de todas essas pessoas, não conseguiria atingir esse tão sonhado objetivo, ao qual muito me dediquei.

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer à Deus que nunca me desamparou em minha vida, aos meus professores pela dedicação e conhecimento compartilhado durante o decorrer desse curso, que permitiram que eu pudesse concluí-lo com excelente aproveitamento, me possibilitando ser uma excelente profissional.

Às minhas duas famílias, pela confiança, respeito e apoio incondicional desde o princípio da minha trajetória estudantil até os dias de hoje, me permitido ter um grande aproveitamento dos estudos e conforto, sou grata pelo privilégio.

Ao meu orientador Msc. Michael Santos, pelo estímulo, dedicação e pelas orientações em geral durante a elaboração deste trabalho.

A minha supervisora do estágio Diana Martins, por não medir esforços em me ensinar tudo que esteve ao seu alcance durante meu período de estágio que resultou neste trabalho.

Ao meu Gestor Lucivaldo Fernandes, que sempre me incentivou e me apoiou como o excelente líder que é.

Aos meus amigos, que me acompanharam e sofreram todas as dores junto a mim durante essa árdua caminhada, e hoje podemos triunfar juntos.

A ciência é sobre saber, a engenharia é
sobre fazer.
(Henry Petroski)

RESUMO

O presente trabalho estudou o comportamento de incrementos secos, de bauxita lavada na planta de beneficiamento de minério da Alcoa de Juruti, com intuito de descobrir qual método de secagem é mais eficiente e os seus respectivos parâmetros de secagem, visando obter informações relevantes ao processo de mineração. Os equipamentos testados foram a chapa aquecedora, estufa e micro-ondas. Ao realizar a secagem do minério em diferentes métodos objetivamos comparar os resultados para poder inferir qual o método que mais se assemelha estatisticamente com o método tido como padrão, de acordo com a norma NBR 15858 (07/2010), que estabelece a preparação e secagem de amostras de minérios aluminosos. Os incrementos para os testes foram coletados na torre de amostragem contida após a usina de lavagem da mina de Juruti. Essa torre foi instalada para se ter conhecimento dos teores importantes do estoque de minério, como Al_2O_3 (óxido de alumínio), SiO_2 (dióxido de silício) Reativa Fe_2O_3 reativo (óxido de ferro), e H_2O (água), conhecimento este, importante para fazer a blendagem do material que será vendido posteriormente. A amostragem se dá por meio de um amostrador linear principal que desvia uma porção de minério para a torre, cortando o fluxo de minério no fim da correia transportadora e posteriormente direciona a outra correia transportadora aos demais amostradores do fluxo, resultando em um incremento que foi coletado e estudado.

Palavra-chave: Amostragem; secagem de minério; bauxita; micro-ondas.

ABSTRACT

This work aims to study the behavior of bauxite washed increments in the ore beneficiation plant of Alcoa Juruti, when dried in different heating equipment, such as hot plate, traditional oven and microwave oven. By drying the ore in different methods, we hope to have a good comparison of the results to infer which method is statistically more similar to the standard method, according to NBR 15858 (07/2010), for preparing and drying aluminum ore samples. The increments for the tests were collected in the sampling tower contained after the Juruti mine washing plant. This tower was installed in order to evaluate the importance of ore stock contents, such as Al_2O_3 (aluminum oxide), reactive SiO_2 (silicon dioxide), reactive Fe_2O_3 (iron oxide), e H_2O (water), important information for blending the material that will be sold later. The sampling is done through a main linear sampler that diverts a portion of the ore to the tower, cutting the flow of ore at the end of the conveyor belt and then directs the other conveyor belt to the other samplers in the flow, resulting in an increment that will be collected and studied.

Keywords: Sampling; ore drying; bauxite; microwave.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de Bauxita por estado do Brasil referente ao ano de 2021.	17
Figura 2 - Principais jazidas de bauxita já sendo exploradas no Pará.	18
Figura 3 - Amostragem em fluxo por um amostrador linear.	20
Figura 4 - Amostragem estática em correia transportadora.	21
Figura 5 - Homogeneização e Quarteamento em base de pilha cônica.....	23
Figura 6 - Fluxograma de amostragem.....	29
Figura 7 - Amostras dispostas dentro de estufa para secagem.....	30
Figura 8 - Amostras de granulado, finos Linha 1 e Linha 2 secando na chapa.	32
Figura 9 - Incremento pesado em bandejas de silicone.....	33
Figura 10 - Incremento sendo seco em Micro-ondas.	33

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Acumulado de dias de chuvas na cidade de Juruti de 2019 a 2022.	26
Gráfico 2 - Acumulado de chuvas (mm) mensais na cidade de Juruti em 2022 até o mês de novembro.	27
Gráfico 3 - Acumulado de chuvas mensais na cidade de Juruti de 2019 a 2022.	27
Gráfico 4 - Curvas de secagens de incrementos granulados.	35
Gráfico 5 - Teste de Grubbs para detecção de Outliers em amostras de micro-ondas.	37
Gráfico 6 - Teste de Grubbs para detecção de outliers em amostras da Estufa.	38
Gráfico 7 - Gráfico de dispersão dos dados Estufa – Micro-ondas.	41
Gráfico 8 - Gráfico de linha ajustada Estufa – Micro-ondas.	41
Gráfico 9 - Gráfico de dispersão Estufa/Micro-ondas, análise 2.	44
Gráfico 10 - Gráfico de dispersão Estufa/Chapa.	44
Gráfico 11 - Gráfico de linha ajustada estufa/micro-ondas, análise 2.	45
Gráfico 12 - Gráfico de linha ajustada estufa – chapa, análise 2.2.	46
Gráfico 13 - Carta de controle dos métodos estufa/chapa.	47
Gráfico 14 - Carta de controle dos métodos estufa/micro.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Minerais presentes na bauxita de Juruti.....	35
Tabela 2 - Teste de Grubbs para dados do micro-ondas.....	37
Tabela 3 - Teste de Grubbs para dados da estufa.....	38
Tabela 4 - Estatísticas descritivas das amostras Estufa-Micro.....	39
Tabela 5 - Estimativa da diferença pareada das amostras Estufa/Micro-ondas.....	39
Tabela 6 - Estimativa da diferença pareada.....	40
Tabela 7 - Estatísticas descritivas das amostras estufa/micro-ondas/chapa.....	42
Tabela 8 - Estimativa da diferença pareada das amostras Estufa/Micro/Chapa.....	43
Tabela 9 - Estimativa da diferença pareada das amostras estufa-micro-chapa.....	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Justificativa.....	15
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo Geral	15
1.2.2 Objetivos Específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Mineração no Pará	16
2.2 Formação geológica da bauxita do Pará.....	17
2.3 Amostragem de minério	19
2.3.1 Amostragem do minério em fluxo.....	19
2.3.2 Amostragem com o minério estático	20
2.3.3 Técnicas de Homogeneização e Quarteamento	22
2.4 Métodos de secagem para controle de qualidade.....	23
2.4.1 Secagem em estufa	23
2.4.2 Secagem em chapa aquecedora.....	24
2.4.3 Secagem em micro-ondas.....	25
2.5 Pluviometria de Juruti.....	25
3 METODOLOGIA.....	28
3.1 Método 1: Secagem em estufa	29
3.1.1 Materiais utilizados	31
3.2 Método 2: Secagem em chapa aquecedora	31
3.2.1 Materiais utilizados	32
3.3 Método 3: Secagem em micro-ondas.....	32
3.3.1 Materiais utilizados	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1 Análises em amostras de secagem correlação estufa/micro-ondas	36
4.2 Análises em amostras de secagem correlação estufa/micro-ondas/chapa.....	42
5 CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS.....	50

1. INTRODUÇÃO

O minério utilizado para estudo neste trabalho é a bauxita, minério de grande importância para a indústria, pois resulta na obtenção do alumínio metálico e de outros compostos de alumínio. Sua formação ocorre principalmente em regiões tropicais e subtropicais por ação do intemperismo sobre aluminossilicatos (COSTANTINO, 2001). Por mais que a bauxita seja descrita como o minério de alumínio, ela não é uma espécie mineral propriamente dita e sim um material heterogêneo formado de uma mistura de hidróxidos de alumínio hidratado contendo impurezas. A bauxita da região norte do Brasil, mais especificamente do Oeste do Pará tem como origem a formação Alter do Chão, sua principal composição é dada predominantemente por gibbsita, hematita, caulinita, quartzo e anatásio (ALBERGARIA, 2018).

Em um empreendimento minerário, uma das principais informações que deve ser conhecida com precisão é a porcentagem de umidade contida no produto vendido, tanto na fase de alimentação da usina, no produto processado e no carregamento do minério para escoamento, pois essa informação é de grande relevância para conhecimento da eficiência do processo de secagem de minério, seja ele realizado pelo método de secagem em pilhas ou por equipamentos específicos. Essa informação é também de extrema relevância para o cliente, pois esse deve conhecer quanto de produto está realmente comprando e quanto desse montante é água. Essa informação de umidade também é válida para processos subsequentes, como exemplo o processo metalúrgico, onde ocorre a extração de metais por fundição em fornos ou outros métodos, com isso o valor de porcentagem de água presente no produto impacta diretamente na produção, pois o tempo necessário de exposição ao calor ou quantidade de reagentes necessários para obtenção do metal de interesse cresce em paralelo ao teor de umidade.

Usualmente, o método utilizado para secagem de amostras de minério de alumínio na obtenção de teor de umidade para controles de processos, é o método gravimétrico (secagem em estufa), que consiste na secagem de uma pequena massa incremental representativa, em estufa aquecida, isso ocorre para remover a umidade presente na amostra, e se ter o controle de qual porcentagem de massa de água está sendo transportada junto ao produto de interesse. Esse método segue as especificações da NBR 15858 (07/2010) para procedimentos de secagem de minérios

de alumínio. Outro método muito utilizado para secagem desse mesmo minério, é a secagem em chapa aquecedora, que se dá por secagem de uma pequena massa de incremento por uma quantidade de tempo e temperatura, parâmetros esses que são ajustados de acordo com cada material.

Os dois métodos citados anteriormente são utilizados em paralelo, com o objetivo de se complementarem, visto que ambos são utilizados para obtenção de teor de umidade, e assim, se conseguir monitorar e controlar processos importantes para a funcionabilidade operacional de um empreendimento minerário.

Considerando esses pressupostos, o presente estudo visa relacionar os resultados obtidos em testes de secagem de bauxita em uma mineradora do Oeste do Pará, em diferentes equipamentos de secagem: estufa aquecedora (método gravimétrico), chapa aquecedora e Micro-ondas, este último, como método alternativo a secagem desse minério. Com propósito de verificar novas possibilidades de secagem de incrementos, visando retorno de resultados parciais de umidade mais rápidos, e ainda tomada de decisões referente a processos de lavabilidade da planta de beneficiamento.

1.1 Justificativa

O conhecimento da porcentagem de umidade existente no minério beneficiado é de extrema relevância para conhecimento de funcionalidade de processos de beneficiamento da usina, bem como carregamento e transporte. Sabendo disso, este trabalho visa estudar alguns equipamentos de secagem e sob determinadas circunstâncias, permitirá obter algumas respostas de maneira hábil, para assim, ter tempo extra para mudança de estratégia, e ajuste de processo caso necessário para se ter a melhor lavabilidade possível na planta de beneficiamento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar testes de secagem em amostras de minério de bauxita, para identificar qual o método de secagem utilizado nas análises de umidade prévia possui maior eficiência para obtenção de resultados em menor tempo de processamento.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Obter retorno de resultados parciais de umidade mais rápidos, para tomada de decisão referente a processos de beneficiamento;
- Encontrar a massa mínima amostral;
- Encontrar o tempo de secagem ótimo por meio de testes;

Descobrir qual o melhor método de secagem correlato a estufa;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mineração no Pará

A mineração no Pará tem sido um dos principais precursores de crescimento da Região Norte, é no Pará que se encontram as duas maiores jazidas de minério da região Norte: Oriximiná, que lavra bauxita, com maior parte da produção destinada à exportação; e a de Serra dos Carajás, que aparece como uma das maiores do planeta e produz o minério de ferro mais puro do mundo. Localizada no sudeste do estado, Carajás possui grande diversidade de minerais, são eles: manganês, cobre, bauxita, ouro, níquel, estanho e outros (SIMINERAL, 2022).

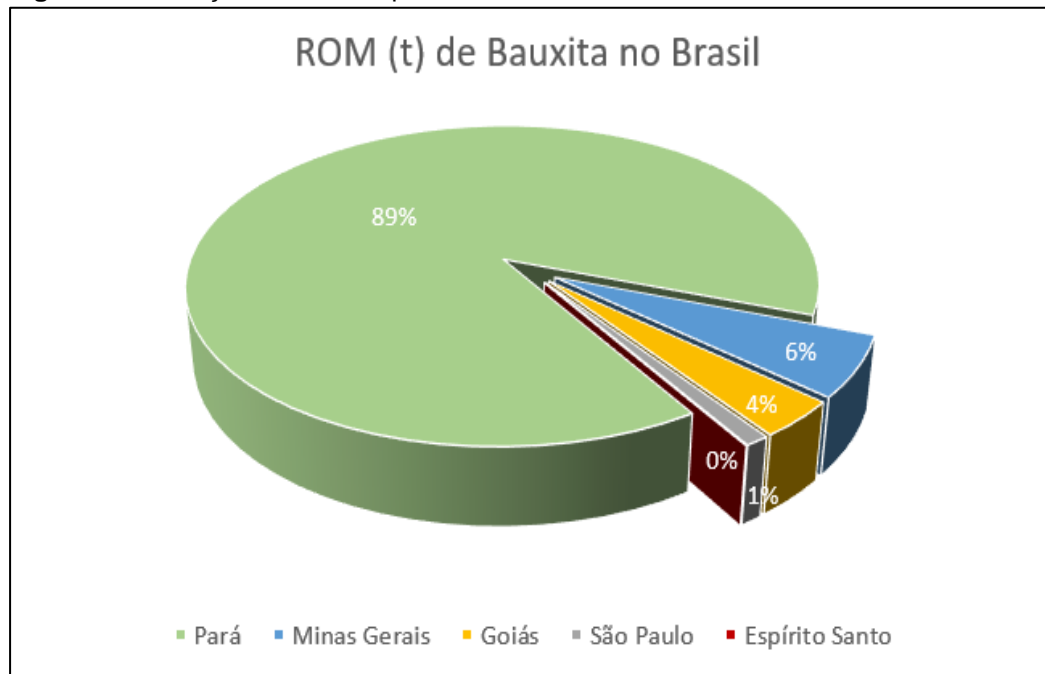
No ano de 2018, cerca de 88% das exportações do Pará correspondiam ao setor minerário e à Transformação Mineral. O minério de ferro continua sendo o principal commodity exportado pela indústria de mineração do Pará, representando US\$ 9,196 bilhões, em seguida vem o cobre, com US\$ 2,064 bilhões, manganês, US\$ 276 milhões, e a bauxita encontrava-se na quarta posição dentre esses principais minérios, seguida pelo níquel, caulim, ouro e silício (SIMINERAL, 2022).

O Pará também é responsável pela terceira colocação de bauxita do mundo, lavrando em Trombetas na região de Oriximiná e em Juruti, no baixo Amazonas, com isso o estado é responsável por 85% das exportações minerárias do Brasil segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (2013) a baixo, a Figura 1 mostra contribuição do estado do Pará na exportação de bauxita do Brasil.

Espera-se que até o ano de 2024 o setor minerário invista cerca de R\$22,013 bilhões no estado do Pará, e outros R\$18,863 bilhões serão investidos em infraestrutura, transformação mineral e outros negócios, por exemplo a produção de

biodiesel. Todo esse investimento gera 266 mil empregos diretos e indiretos na cadeia produtiva local e responde por 20% do PIB paraense (SIMINERAL, 2022).

Figura 1 - Produção de Bauxita por estado do Brasil referente ao ano de 2021.



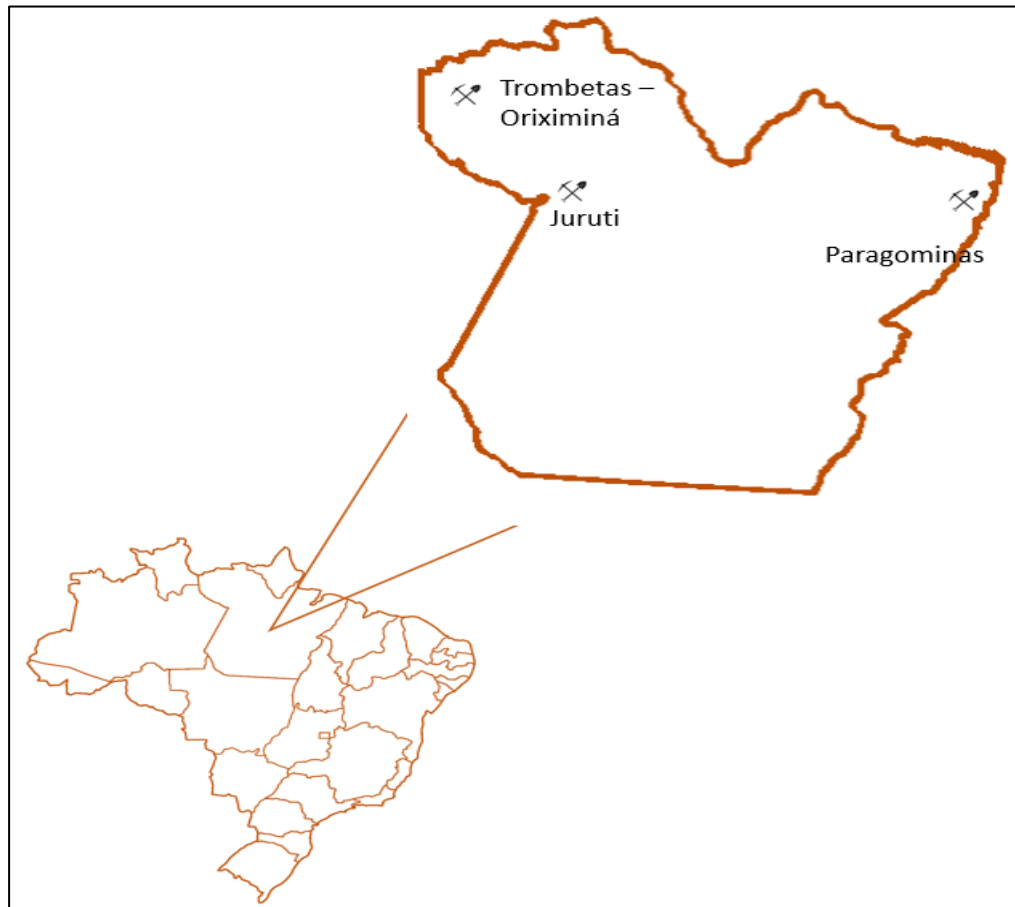
Fonte: ANM, 2022.

2.2 Formação geológica da bauxita do Pará

A rocha do minério de bauxita é poliminerálica, ou seja, composta por mais de um mineral de alumínio e os mais importantes entre eles são a gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$, diásporo $\text{AlO}(\text{OH})$ e a bohemita $\text{AlO}(\text{OH})$. Esses minerais são oxi-hidróxidos de alumínio e, suas proporções na rocha, variam entre os depósitos existentes, assim como o tipo e a quantidade das impurezas do minério, essas impurezas são: óxidos de ferro, argila, sílica, dióxido de titânio etc. O teor rentável da bauxita para ser economicamente viável para a extração, varia na quantidade de alumina (Al_2O_3) existente na rocha, estando entre 50 e 55% e o teor mínimo para que ela seja lavrável é de 30% (ALBERGARIA, 2018).

As principais reservas de Bauxita do Pará, conforme citadas neste trabalho e visualizadas na Figura 2, são exploradas nas redondezas de Oriximiná (Trombetas), Juruti e Paragominas, estão localizadas na região Oeste do Pará, e essas jazidas são essencialmente formadas por rochas sedimentares do Siluriano ao Quaternário, sobrepostas às rochas do embasamento Pré-Cambriano (MENDES, 2012).

Figura 2 - Principais jazidas de bauxita já sendo exploradas no Pará.
Fonte: ABAL, 2017.



A formação da bauxita ocorre na presença de um clima tropical (temperatura média anual acima de 20 °C), alternando as estações seca e úmida, tal qual ocorre na Amazônia, onde existem longos períodos de chuva e também de sol, que favorecem o processo natural de lixiviação. Dessa forma, silicatos e argilominerais são decompostos, então há remoção da maior parte da sílica, enquanto os óxidos de alumínio e ferro são concentrados. Sabendo disso, os principais fatores que levam a eficácia geração de bauxita são: rocha porosa; cobertura vegetal com adequada atividade bacteriológica; topografia plana ou pouco acidentada; longo período de estabilidade e intensa alteração das condições climáticas, principalmente, as estações seca e úmida (ALBERGARIA, 2018).

2.3 Amostragem de minério

A amostragem, no geral, segundo Góes, Luz e Possa (2010, p. 24) é uma sequência de estágios de preparação de uma porção do todo que passa por britagem, moagem, secagem, homogeneização, transferência etc, onde esses estágios de amostragem propriamente dita chamado de redução da massa de material, estão suscetíveis a alteração do teor da característica de interesse e, portanto, à geração de erros de preparação e erros de amostragem, sendo alguns dos principais deles, o Erro Total de Amostragem (aE), segundo os estudos voltados à amostragem realizados por Pierre Gy que foi o precursor da teoria da amostragem em 1950, onde essa série de estudos diz que em qualquer procedimento de amostragem existem erros associado, com o qual devesse conviver. Ou seja, a teoria mostra a incerteza da informação que se trabalha, o que é fundamental para a tomada de decisão com relação aos procedimentos adotados para a amostragem real ser de fato representativa, ou seja, o mais similar possível com o universo amostrado (CETEM, 2004). Alguns nos erros listados na teoria de Gy são o erro Total de amostragem, que é a somatória de dois outros erros o Erro de Amostragem e o Erro de Preparação, que estão relacionados a outros diversos erros associados a coleta e manuseio dos incrementos tratados (CETEM, 2004).

A amostragem de minérios pode ser dividida em duas metodologias, de acordo com o estado em que se encontra a amostra, estático ou em movimento:

- amostragem do minério em fluxo e (Figura 3);
- amostragem do minério estático (Figura 4).

2.3.1 Amostragem do minério em fluxo

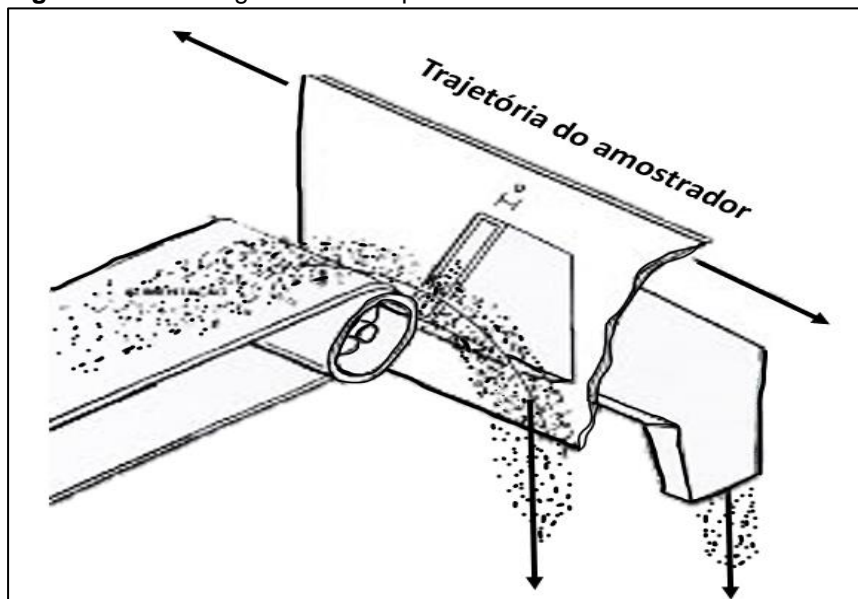
A amostragem em fluxo ocorre em circuitos de minério contínuo, por exemplo em correias transportadoras ou em tubulações de minério etc.

A amostra primária é formada a partir da coleta de incrementos e está sujeita a todos os erros de amostragem existentes, porém, para resolver esse problema é feito um número maior de incrementos, pois quanto mais incrementos, menor o erro total. O número mínimo de incrementos está relacionado à massa mínima necessária para formar a amostra primária (GOES, POSSA e LUZ, 1991). A coleta de incrementos é realizada em intervalos iguais de tempo, quando a vazão e os parâmetros de

interesse do minério são constantes. Caso a vazão não seja constante, o incremento é coletado em função de uma certa quantidade de massa acumulada ao longo do tempo (GOES, POSSA e LUZ, 1991).

A coleta de incrementos é realizada de forma aleatório quando há variações periódicas de vazão e de parâmetros de interesse do minério. Quando o plano de amostragem estabelecer que determinados pontos na usina sejam amostrados num mesmo momento, é aconselhável o uso de amostradores automáticos (GOES, POSSA e LUZ, 1991). Não sendo possível a coleta simultânea, é recomendável que ela seja realizada em sentido inverso ao do fluxo, para que não haja alteração das características das amostras e esta permaneça representativa, abaixo temos a figura de um amostrador linear após uma correia transportadora, passando por um fluxo de minério contínuo para coletar incrementos.

Figura 3 - Amostragem em fluxo por um amostrador linear.



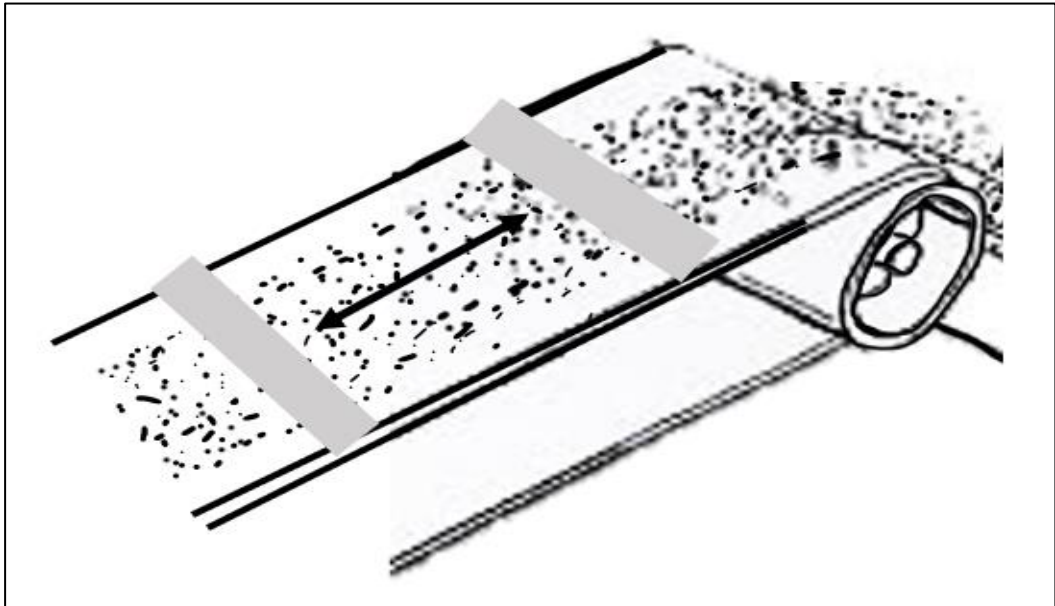
Fonte: Resende, 2014 Apud Santos, 2015.

2.3.2 Amostragem com o minério estático

Esse modelo de amostragem está baseado na coleta de incrementos armazenados em locais estáticos, como pilhas ou correias transportadoras paradas para coleta manual de incrementos, conforme visto na Figura 4, onde se tem uma correia com minério e duas placas metálicas segregando uma parte do material para a retirada do incremento, essa segregação é importante para manter separado somente o incremento que irá ser amostrado, sem que este de alguma forma se

misture com o material remanescente na correia, a fim de evitar erros de amostragem relacionados a coleta.

Figura 4 - Amostragem estática em correia transportadora.



Fonte: Resende, 2014 Apud Santos, 2015. Adaptado pelo autor, 2022.

Nessa condição de coleta, a amostragem está sujeita aos erros de preparação, segregação e o erro fundamental de amostragem. Os erros mais comuns praticados na preparação de amostras, são os seguintes: perda de partículas da amostra, contaminação da amostra, por material estranho como a ferrugem, minério estranho, poeira etc.

O erro fundamental de amostragem, que é o único que não pode ser evitado, pois teoricamente a massa ideal da amostra seria aquela que engloba todo o seu universo. Por fim outro erro importante de se conhecer, para evitar de se cometê-lo é o de segregação este é observado principalmente em silos e pilhas, onde as partículas maiores e/ou mais densas tendem a estratificar-se. Esse erro é minimizado através da homogeneização do material a ser amostrado e da diminuição da dimensão dos incrementos e conseqüente aumento do número de incrementos que compõem a amostra.

Um aspecto a ser considerado é o tamanho das partículas, para que se possa trabalhar com uma amostra de massa menor, é necessário diminuir a sua granulometria. De uma maneira geral, esta redução de granulometria pode ser realizada da seguinte maneira, até cerca de 2 polegadas, utilizam-se britadores de

mandíbulas; 2 polegadas até 14 malhas, britadores cônicos ou de rolos; abaixo de 14 malhas, moinho de barras ou bolas, moinhos de discos, pulverizadores ou trituradores manuais (GOES, POSSA e LUZ, 1991).

2.3.3 Técnicas de Homogeneização e Quarteamento

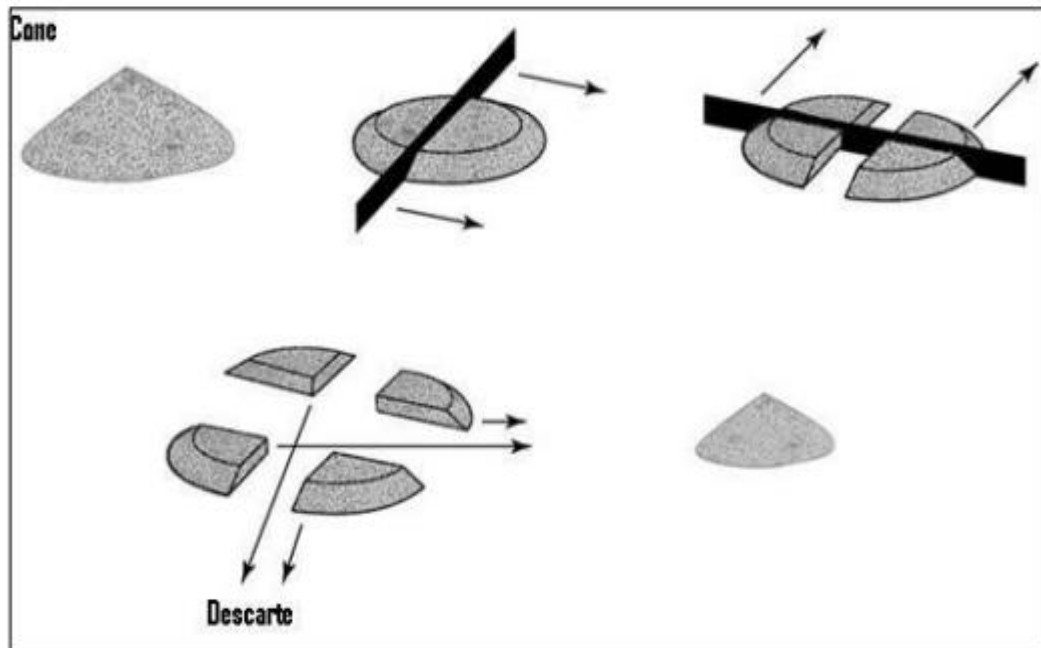
Para que se tenha uma amostragem representativa, é imprescindível que a amostra esteja bem homogeneizada antes de ser quarteada para que todas as partículas tenham a mesma oportunidade de ser coletada como incremento. A retirada dessa amostra, em todas as etapas de preparação, deve ser feita observando técnicas de homogeneização e Quarteamento para que não se perca a representatividade no decorrer do processo.

Um dos métodos mais utilizados para a homogeneização é a homogeneização por pilha cônica alongada ou tronco de pirâmide, e a homogeneização por tombos de minério. Vamos nos ater somente a esses métodos, pois estes são os utilizados no processo de preparação de amostras deste trabalho.

O método de homogeneização de partículas por tombos se dá pela movimentação da massa amostrada em uma lona de material impermeável onde o material é tombado de um lado para o outro por algumas vezes, que dependem da massa homogeneizada e depois quarteado. Segundo Santos (2015), as pilhas de homogeneização auxiliam na dissipação de agrupamentos de partículas de qualquer natureza e, portanto, minimizam o erro de segregação sendo muito práticas nos trabalhos de campo, porque não utilizam equipamentos sofisticados.

Após a homogeneização, é realizado o Quarteamento, que pode ser feito manualmente, conforme a Figura 5, ou por meio de equipamentos específicos, como por exemplo o quarteador Jones.

Figura 5 - Homogeneização e Quarteamento em base de pilha cônica.



Fonte: Resende, 2014 Apud Santos, 2015.

2.4 Métodos de secagem para controle de qualidade

2.4.1 Secagem em estufa

Para padronização devido as normas existentes, a maioria das vezes a secagem convencional de minério é realizada em uma estufa. Este equipamento robusto, permite a secagem do minério por meio de transferência de calor por convecção, onde ocorre a troca de calor entre um fluido e um sólido. Então o ar aquecido por uma fonte de energia, transfere calor para a superfície sólida do produto úmido. O gradiente de temperatura entre esta superfície aquecida e o centro do material provoca, então, a troca de calor entre estas duas regiões, agora por condução térmica.

Existem alguns modelos de estufas, dentre elas a estufa com ventilação forçada de ar quente, esse equipamento possui uma cabine com parede dupla e isolamento térmico. A câmara de secagem possui apoios para as bandejas onde as bandejas com minério previamente preparados são desidratadas. A distância entre uma bandeja e outra, a dimensão das bandejas e a quantidade de material a ser colocada, dependem do tipo de produto a ser desidratado (COSTA, 2005 Apud DIAS, 2013).

Esses equipamentos são dotados de ventiladores centrífugos ou axiais para realizar a circulação do ar que pode escoar sobre as bandejas ou através delas. A velocidade do ar aquecido pode variar (0,5 a 3,0 m/s) conforme o seu sentido de movimentação em relação às bandejas. Velocidades mais baixas podem ser empregadas sem prejuízo ao processo de desidratação quando o ar quente atravessa a camada de produto disposta sobre a bandeja (COSTA, 2005 *Apud* DIAS, 2013).

2.4.2 Secagem em chapa aquecedora

A chapa aquecedora é um equipamento de laboratório que possui diversas utilidades e são indispensáveis em várias especialidades laboratoriais. Basicamente, pode-se definir como função da chapa aquecedora o aquecimento uniforme de substâncias inseridas no equipamento por meio de um recipiente.

O aquecimento constante e uniforme das amostras colocadas sobre a plataforma da chapa aquecedora é feito conforme programação do equipamento. Os níveis de temperatura podem ser controlados. Este equipamento de laboratório é constituído por uma resistência elétrica e uma plataforma metálica.

Existem diferentes modelos de chapa aquecedora que possuem particularidades específicas para cada tipo de procedimento a ser elaborado. Os tipos de equipamentos para laboratório são diferenciados conforme as faixas de temperatura que podem atingir, tipos de plataforma metálica e a opção de controles digitais ou analógicos.

No setor minerário, usualmente se usa esse equipamento para aquecimento de minério, com o objetivo de acelerar a secagem e obter-se o teor de umidade presente no incremento. O aquecimento ocorre por condução, onde o equipamento aquecido transfere calor para o incremento depositado sobre ele, desta maneira, permite o aquecimento das moléculas de água e conseqüentemente a sua evaporação, resultando em uma massa seca, que pode ser analisada, dependendo do seu fim.

2.4.3 Secagem em micro-ondas

Segundo Athayde (2019), as microondas são radiações eletromagnéticas não ionizantes, de frequência compreendida entre 300 MHz e 300 GHz. Essas ondas são derivadas da energia elétrica, e podem ser refletidas por um espelho simples como uma folha metálica, refratadas em uma interface dielétrica e podem ser focalizadas por refletores parabólicos ou antenas.

As vantagens do processo de aquecimento pelo emprego de micro-ondas em relação ao aquecimento convencional se dão devido ao micro-ondas conseguir aquecer o minério sem contato direto, ocasionando em transferência de energia térmica com rapidez, aquecimento volumétrico, iniciando-se no interior do material, além do alto nível de segurança e automação. Existem diversas possibilidades de aplicação de micro-ondas na área de processamento mineral e entre elas podemos destacar o aquecimento de minérios antes da moagem, secagem, redução carbotérmica de óxidos minerais, lixiviação, fusão, pré-tratamento de minérios e concentrados de ouro refratário, regeneração de carvão etc, (COSTA, 2005 *Apud* DIAS, 2013).

Uma das aplicações que vêm obtendo sucesso é a determinação de umidade de minérios em laboratório, pois a quantidade de amostra manuseada é pequena. Magalhães, Lima e Souza (2002), estudaram o processo de secagem de bauxita na Mineração Rio do Norte utilizando essa mesma análise comparativa (micro-ondas, estufa e chapa), com o objetivo de se ter resultados mais rápidos na tomada de decisão, e obteve êxito, pois seus resultados mostraram mais eficiência no método do micro-ondas, que secou mais rápido que a chapa (55min) e a estufa (06h), possibilitando mais tempo para ajuste de processos, pois o tempo em que demora pra se ter resultados é o tempo que se opera as “cegas” digamos assim, o processo de lavagem.

2.5 Pluviometria de Juruti

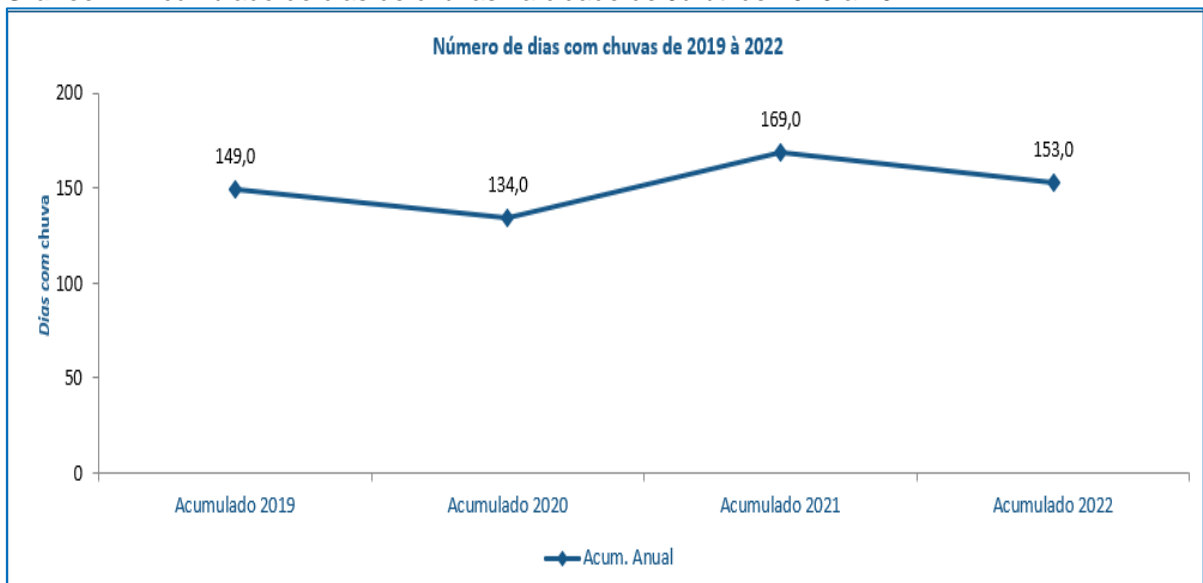
Para entender a importância do controle de umidade em processos minerários, principalmente os que envolvem transporte fluvial, é necessário conhecer a relação da região com as chuvas periódicas e quanto elas podem afetar na umidade no minério vendido. Então deve-se observar e monitorar a quantidade de

chuva que cai durante o ano, para se conhecer o volume de água que o produto foi exposto e como isso afeta os parâmetros de segurança do embarque, quando se trata de Limite de Umidade Transportável da Bauxita (LUT), esse termo se refere a quantidade máxima transportável de água que a bauxita pode ser exposta, sem oferecer risco de liquefação do material, quando transportada por meios fluviais, caso contrário pode ocasionar em acidentes fluviais como adernamento de navios.

A região de Juruti é considerada sazonal quando se trata de chuvas, pois existe uma época do ano onde se tem chuvas com mais frequências e outra em que as chuvas diminuem. Normalmente esse período é de dezembro a junho de julho a dezembro, respectivamente.

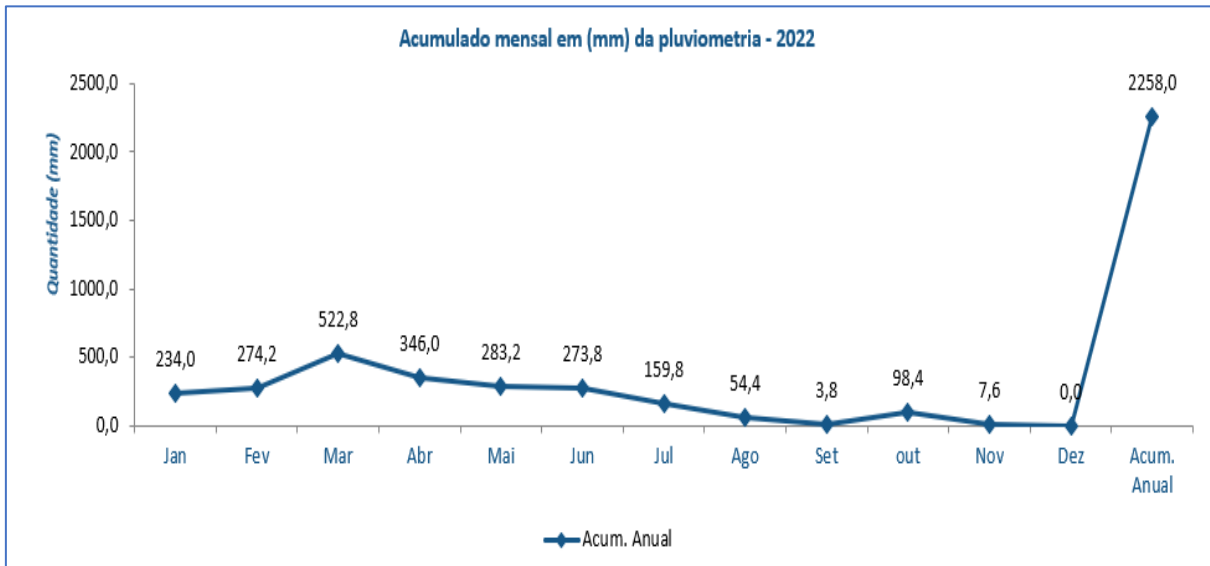
Para se ter o controle da pluviometria diária e anual, existem estações pluviométricas que monitoram e coletam os dados referente as chuvas na cidade e alguns desses dados estão contidos nos Gráficos 1, 2 e 3 abaixo.

Gráfico 1 - Acumulado de dias de chuvas na cidade de Juruti de 2019 a 2022.



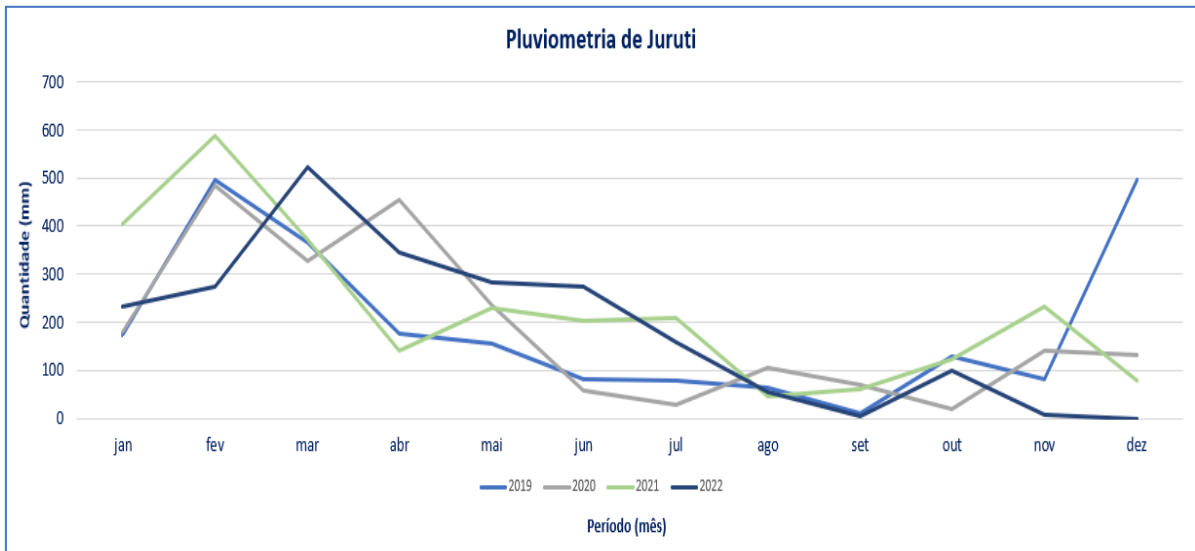
Fonte: Autor (2022).

Gráfico 2 - Acumulado de chuvas (mm) mensais na cidade de Juruti em 2022 até o mês de novembro.



Fonte: Autor (2022).

Gráfico 3 - Acumulado de chuvas mensais na cidade de Juruti de 2019 a 2022.



Fonte: Autor (2022).

3 METODOLOGIA

Para a realização dos testes foram coletados incrementos de processo por meio de amostragem de minério no fluxo de empilhamento da planta de Juruti. O material amostrado foi o granulado de bauxita lavada, com faixa granulométrica entre 3 polegadas e 0,0015 polegadas (+400 mesh), abaixo disso, são os contaminante que são removido em sua maior parte na lavagem do material na usina de beneficiamento.

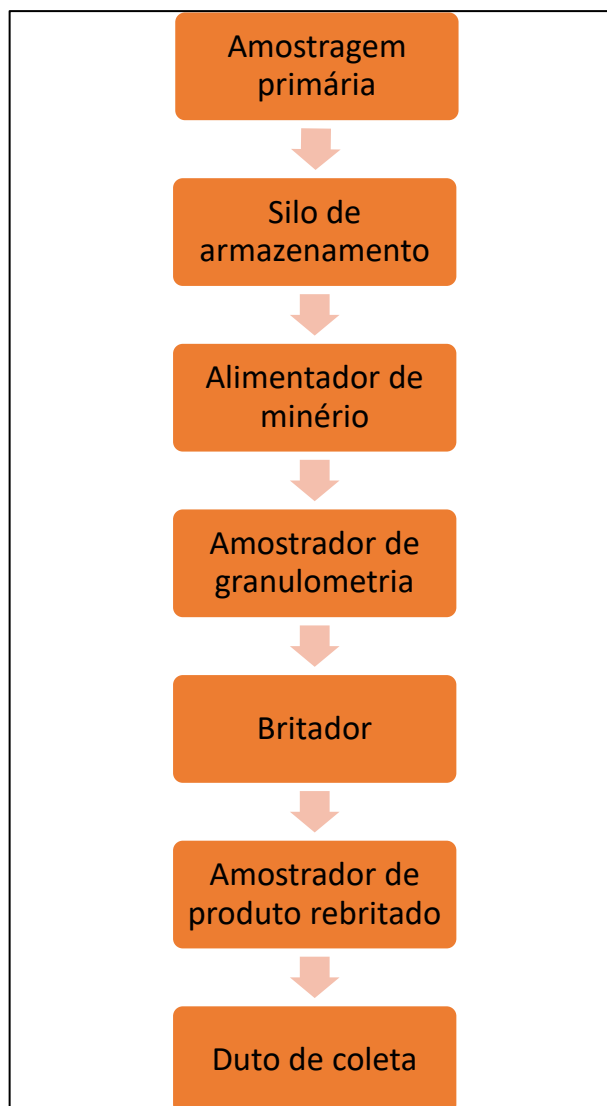
A amostragem é feita por um amostrador primário do tipo cortador linear de fluxo, que fica instalado em uma correia transportadora imediatamente após a saída da Usina de Beneficiamento. Esse amostrador faz um corte de material a cada 200 toneladas produzida, quando a produção é considerada normal, o que equivale a aproximadamente 15 minutos de intervalo entre um corte e outro, a massa é em torno de 200 a 250 kg. O incremento coletado é direcionado por uma correia transportadora até o circuito de amostragem, uma torre de amostragem instalada sobre a correia de empilhamento de material lavado.

Os principais equipamentos contidos na Torre de Amostragem são:

- Correia transportadora;
- Silo de armazenamento;
- Alimentador de minério;
- Amostrador de produto para análise granulométrica;
- Britador de rolos;
- Amostrador de produto rebitado;
- Duto de coleta.

O material utilizado para os testes de secagem foi coletado durante o ano de 2022, com início em março e término em novembro deste mesmo ano, os incrementos foram coletados no amostrador de produto britado, ou seja, material que possui granulometria reduzida para ajuste da massa amostral, onde a faixa granulométrica final está contida entre 1 polegada e 0,0015 polegadas (+400 mesh). Abaixo temos um fluxograma de amostragem da torre citada anteriormente (Figura 6).

Figura 6 - Fluxograma de amostragem.



Fonte: Autor (2022).

3.1 Método 1: Secagem em estufa

Para esse método, foram coletados incrementos de até 3kg em um amostrador específico localizado na torre de amostragem do circuito de empilhamento de minério. Os incrementos foram depositados em bandejas de alumínio previamente taradas, e aferido o peso da amostra úmida. Em seguida adicionadas a estufa de secagem à uma temperatura de 105° C por 06h conforme (Figura 7), para obtenção de peso final seco, a fim de calcular o teor de umidade conforme equação (1).

Figura 7 - Amostras dispostas dentro de estufa para secagem.



Fonte: Alcoa Juruti - Controle de Qualidade, 2022.

$$U (\%) = \frac{m2 - m3}{m2 - m1} X 100 \quad (1)$$

U (%) = umidade em porcentagem

m1 = massa da bandeja

m2 = massa da bandeja mais massa úmida

m3 = massa da bandeja mais massa seca.

É importante frisar, que esse método é utilizado como oficial de resultados na empresa, pois segue todos os parâmetros estabelecidos pela norma NBR 15858 de 07/2010, sabendo disso, é importante dizer que os demais métodos estudados aqui, tem o objetivo de servir como paralelo a este, a fim de obter-se resultados mais rápidos para comparativo de teores de umidade.

3.1.1 Materiais utilizados

- Estufa de Secagem e Esterilização – Modelo 320 - SE – Circulação Mecânica – 220 Volts – Marca FANEM.
- Balança digital Sartorius – Modelo PMA 35001– Campo de pesagem de 5,0g a 35000,0 g – desvio padrão de 0,1 g.
- Assadeira Quadrada de alumínio 35x20x05cm.
- Termômetro Fluke T3000 FC.
- Pincel de cerdas, para limpeza das bandejas.
- Espátula para manuseio de amostras.
- Peso padrão de 2kg para calibração da balança.

3.2 Método 2: Secagem em chapa aquecedora

Para este método, foram coletados incrementos de até 1kg na torre de amostragem do produto em paralelo aos incrementos utilizados para aferição de umidade oficial e análise química do processo (método da estufa). Esses incrementos foram adicionados em bandejas previamente taradas e por fim postos sobre a chapa aquecedora à uma temperatura de 175 °C por 1 hora conforme Figura 8, para obtenção de peso final seco, e desta forma poder calcular o teor de umidade pela mesma fórmula utilizada para o cálculo de umidade de incrementos secos em estufa.

Esse método de secagem é realizado com temperatura superior a especificada para a secagem de minério de alumino, pois é utilizado para se obter os resultados mais rápidos e assim conseguir resultados prévios de umidade para a planta de lavagem.

Figura 8 - Amostras de granulado, finos Linha 1 e Linha 2 secando na chapa.



Fonte: Alcoa Juruti - Controle de Qualidade, 2022.

3.2.1 Materiais utilizados

- Chapa aquecedora – Modelo 509D – 220 V – Potência 1600W - Marca Fisatom.
- Termômetro Digital Infravermelho – Raytec.
- Balança digital Sartorius – Modelo PMA 35001– Campo de pesagem de 5,0g a 35000,0 g – desvio padrão de 0,1 g.
- Assadeira Quadrada de alumínio, 23x20x03 cm.
- Pincel de cerdas, para limpeza das bandejas.
- Espátula para manuseio de amostras.
- Peso padrão de 2kg para calibração da balança.

3.3 Método 3: Secagem em micro-ondas

Para o procedimento de secagem e determinação de umidade em micro-ondas, a massa dos incrementos coletada foi entre 0,8kg e 1kg, e foram depositadas em uma bandeja de silicone (figura 8), previamente tarada e após isso, postas para secar no micro-ondas com a potência de 70% do equipamento (1.050 W, equivalente a aproximadamente 225°C).

Figura 9 - Incremento pesado em bandejas de silicone.



Fonte: Alcoa Juruti - Controle de Qualidade, 2022.

Após descobrir o tempo ótimo de secagem por meio de testes e construção de curva de secagem, conforme os dados que serão apresentados nos resultados (item 4), os incrementos foram secos de forma contínua por 30 minutos (figura 10). Outros 64 incrementos e os valores de peso seco foram adicionados a uma planilha para se obter o valor da umidade final e se ter o controle dos dados obtidos para posteriormente fazer as análises estatísticas.

Figura 10 - Incremento sendo seco em Micro-ondas.



Fonte: Alcoa Juruti - Controle de Qualidade, 2022.

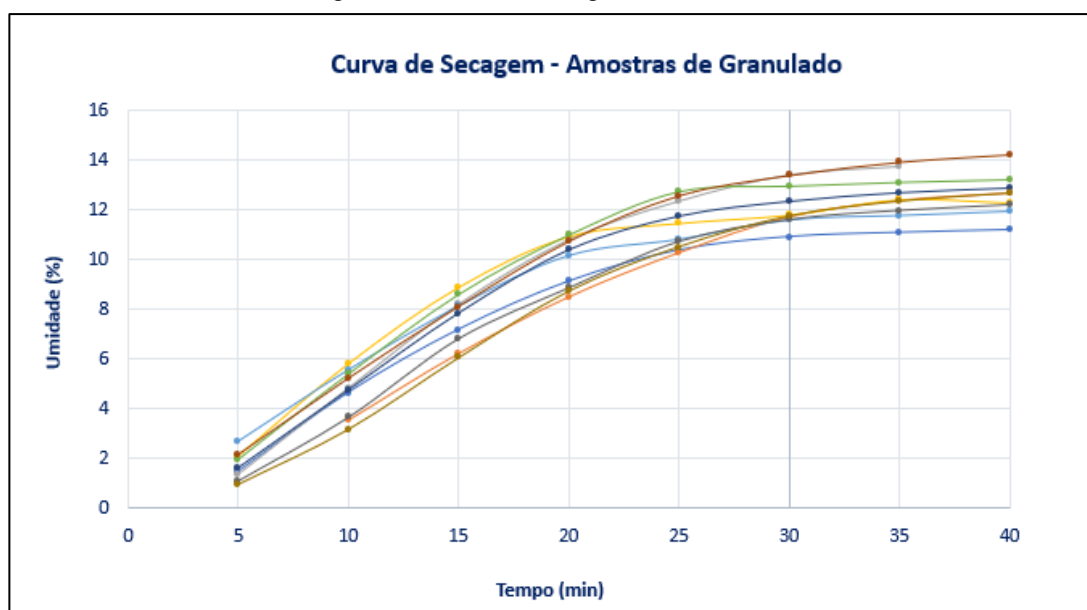
3.3.1 Materiais utilizados

- Micro-ondas MENUMASTER Comercial MCS10TSB, potência de 1500W, Tensão 220 V.
- Termômetro Digital Infravermelho – Raytec.
- Balança digital Sartorius – Modelo PMA 35001– Campo de pesagem de 5,0g a 35000,0 g – desvio padrão de 0,1 g.
- Assadeira Quadrada de Silicone, cinza 28x25x05cm.
- Pincel de cerdas, para limpeza das bandejas.
- Espátula para manuseio de amostras.
- Peso padrão de 2kg para calibração da balança.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A secagem de incrementos de minério granulado em Micro-ondas, produto da usina de lavagem da mina de bauxita de Juruti, foi feita na Sala de Processamento de Amostras do Controle de Qualidade da empresa *Alcoa Alumina World* localidade de Juruti, utilizando procedimentos de atividades internas da empresa, como o procedimento de secagem em micro-ondas, procedimento de secagem em estufa, secagem em chapa aquecedora, aferição de balança e o procedimento de preparação de incrementos de granulado, todos redigidos e disponibilizados pela Alcoa (2022). A norma para secagem de minério de alumínio NBR 15858 (07/2010) também foi utilizada para a construção desse estudo. Os dados obtidos a partir da secagem, foram tratados utilizando o Excel e a ferramenta de tratamento de dados estatísticos, Minitab disponibilizada também pela empresa.

Para início dos testes, foram construídas curvas de secagem (Gráfico 4) para determinar o tempo adequado para secagem do material, e encontrar resultado similar ao obtido pela relação chapa e estufa. Para determinação da curva de secagem, foram secos 10 incrementos em intervalos de 5 em 5 minutos, por 40 minutos no total, até que se visualize a estabilidade da curva de secagem.

Gráfico 4 - Curvas de secagens de incrementos granulados.

Fonte: Autor (2022).

E então descobriu-se que o tempo ótimo de secagem para esse produto é de 30 minutos para uma massa de aproximadamente 1kg, a uma temperatura de aproximadamente 225°C que equivale a 70% da potência do equipamento utilizado. Esses parâmetros foram estabelecidos, pois utilizando mais tempo ou potência superior a citada, observou-se que algumas partículas do incremento entravam em combustão

A Tabela 1 apresenta os valores de percentual médio dos principais minerais que compõem o minério de Bauxita proveniente do depósito de Juruti. A amostra analisada corresponde ao produto da planta de lavagem dessa localidade.

Tabela 1 - Minerais presentes na bauxita de Juruti.

Componentes	Teor médio está entre (%)
Al ₂ O ₃	46 - 50
H ₂ O	11 - 13
SiO ₃	3 - 4
Fe ₂ O ₃	12 - 14
TiO ₂	1 - 2
Outros	17 - 27

Fonte: Autor (2022).

Nessa tabela se pode observar os valores em teor dos principais minerais existentes na bauxita de Juruti, que são considerados relevantes para o processo. Como material de interesse temos o Óxido de alumínio (Al_2O_3) e os demais são contaminantes, e o principal é a Sílica (SiO_2), pois interfere em processos futuros de metalurgia causando gastos extras no processo de extração da Alumina.

4.1 Análises em amostras de secagem correlação estufa/micro-ondas

Para esta primeira parcela de dados, foi feita uma série de análises estatísticas para verificar se a correlação de dados entre os dois métodos estudados, a secagem em Estufa por 6 horas e secagem em Micro-ondas por 30 minutos. Objetivando ter resultados mais precisos e assertivos, foi realizado a análise de *outliers*¹ nos dados obtidos dos testes de secagem por 30 minutos no micro-ondas.

Devido alguns dados terem sofrido reações adversas a secagem, ou seja, algumas amostras encandeceram, resultando em perda de massa excessiva, fez-se necessário as análises a seguir. O método estatístico utilizado para a obtenção dos resultados foi o descrito abaixo, tanto para os dados do micro-ondas, quanto para os dados da Estufa.

O primeiro teste realizado foi o teste de *Grubbs* utilizado para verificar a existência de *outliers*, ou seja, pontos fora da curva ou fora do conjunto de dados obtidos, como é o caso. Com ele, é possível encontrar valores que devem ser removidos do conjunto de dados para uma análise mais assertiva. O teste foi realizado pela equação 2 abaixo.

$$G = \frac{[x_i - \bar{x}]}{s} \quad (2)$$

G = Teste de *Grubbs*.

x_i = Razão entre as diferenças dos resultados.

\bar{x} = Média dos resultados.

S = Desvio padrão.

- Hipótese nula: Todos os valores dos dados são provenientes da mesma população normal.
- Hipótese alternativa: O menor ou maior valor dos dados é um *outlier*.
- Nível de significância: $\alpha = 0,05$.

Tabela 2 - Teste de Grubbs para dados do micro-ondas.

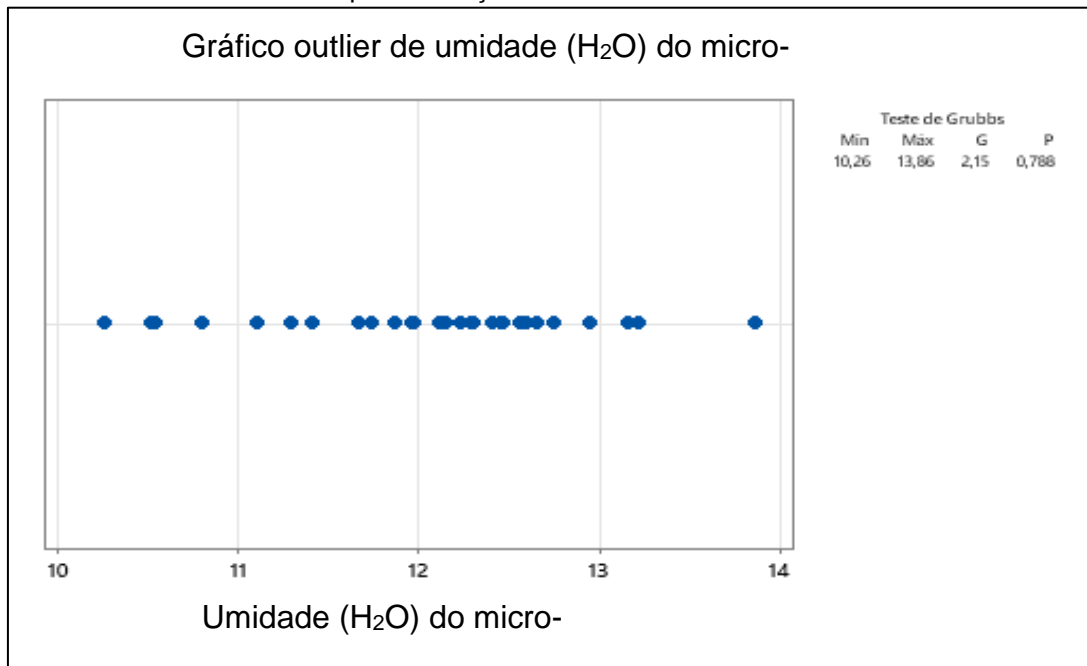
Variável	N	Média	Desv. Pad.	Valor mín.	Valor máx.	G	P
H ₂ O Micro	30	12,065	0,840	10,262	13,856	2,15	0,788

N: Número de dados tratados; G: Número do teste de *Grubbs*; P: Probabilidade que mede a evidência contra a hipótese nula.

Fonte: Autor (2022).

Como resultado obteve-se que nenhum *outlier*¹ no nível de significância de 5% foi encontrado, ou seja, não teve *outliers*, o que pode ser visualizado no gráfico abaixo, onde as unidades se comportam em linha e seguem comportamento relativamente regular.

Gráfico 5 - Teste de Grubbs para detecção de Outliers em amostras de micro-ondas.



Fonte: Autor (2022).

¹ Os dados que se diferenciam de todos os outros são chamados de **outliers**, são pontos fora de uma curva normal.

Também foi realizado o teste de *outliers* nos resultados comparativos tidos como referência para o teste, ou seja, os dados de secagem da estufa. Os parâmetros de métodos estatísticos de análise foram os mesmos utilizados nos dados do micro-ondas cujos valores podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 - Teste de Grubbs para dados da estufa.

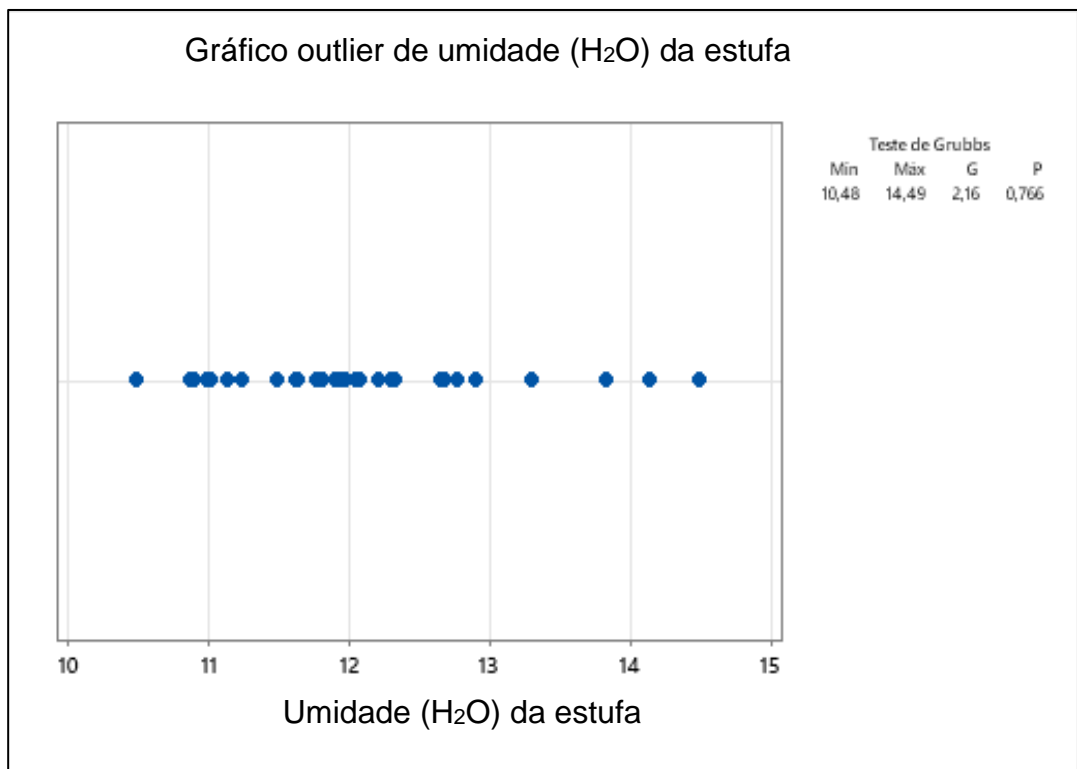
Variável	N	Média	Desv. Pad.	Mínimo	Máximo	G	P
H ₂ O Estufa	30	12,193	1,065	10,480	14,490	2,16	0,766

N: Número de dados tratados; G: Número do teste de *Grubbs*; P: Probabilidade que mede a evidência contra a hipótese nula.

Fonte: Autor (2022).

Como resultado obteve-se que nenhum *outlier* no nível de significância de 5% foi encontrado, ou seja, também não teve *outliers* para esses dados, possibilitando a continuidade do processo de análise.

Gráfico 6 - Teste de Grubbs para detecção de outliers em amostras da Estufa.



Fonte: Autor (2022).

Após o tratamento realizado acima, foi feito o teste T pareado para verificar se as amostras são estatisticamente semelhantes ou não, os testes-t são testes de hipóteses que permite comparar médias. São chamados de testes-t porque cada um resume seus dados amostrais em um número, o valor-t. Esse valor foi calculado segundo a equação 3 e os dados obtidos são os das tabelas 4 e 5.

$$t = \frac{(\bar{x} - \mu_0)}{s/\sqrt{n}} \quad (3)$$

t = Teste t pareado para uma amostra

\bar{x} = Razão entre as diferenças dos resultados.

μ_0 = Parâmetro das médias amostral das diferenças.

S = Desvio padrão.

\sqrt{n} = Raíz do número de amostras.

Tabela 4 - Estatísticas descritivas das amostras Estufa-Micro.

Amostra	N	Média	Desv. Padrão	Ep Média
H ₂ O Micro	30	12,065	0,840	0,153
H ₂ O Estufa	30	12,193	1,065	0,194

N: Número de dados tratados; EP Média: Erro padrão de da média.

Fonte: Autor (2022).

Tabela 5 - Estimativa da diferença pareada das amostras Estufa/Micro-ondas.

Média	Desv. Padrão	Ep Média	IC de 95% da Diferença μ
-0,129	1,131	0,206	(-0,551; 0,293)

EP Média: Erro padrão de da média; Diferença μ : média da população de H₂O Micro-ondas/H₂O Estufa.

Fonte: Autor (2022).

O resultado do teste apresentou $p > 0,05$, logo, se pode afirmar que as amostras são estatisticamente iguais, possibilitando seguir a análise para novas conclusões, por exemplo, que a correlação é boa, então pode ser que o método de secagem em micro-ondas possa ser implementado como método auxiliar de processo

correlato à secagem em estufa. Abaixo temos as hipóteses aplicadas ao teste e os valores obtidos estão contidos na tabela 6.

Hipótese nula H_0 : Diferença $\mu = 0$

Hipótese alternativa H_1 : Diferença $\mu \neq 0$

Tabela 6 - Estimativa da diferença pareada.

Valor t	Valor p
-0,62	0,538

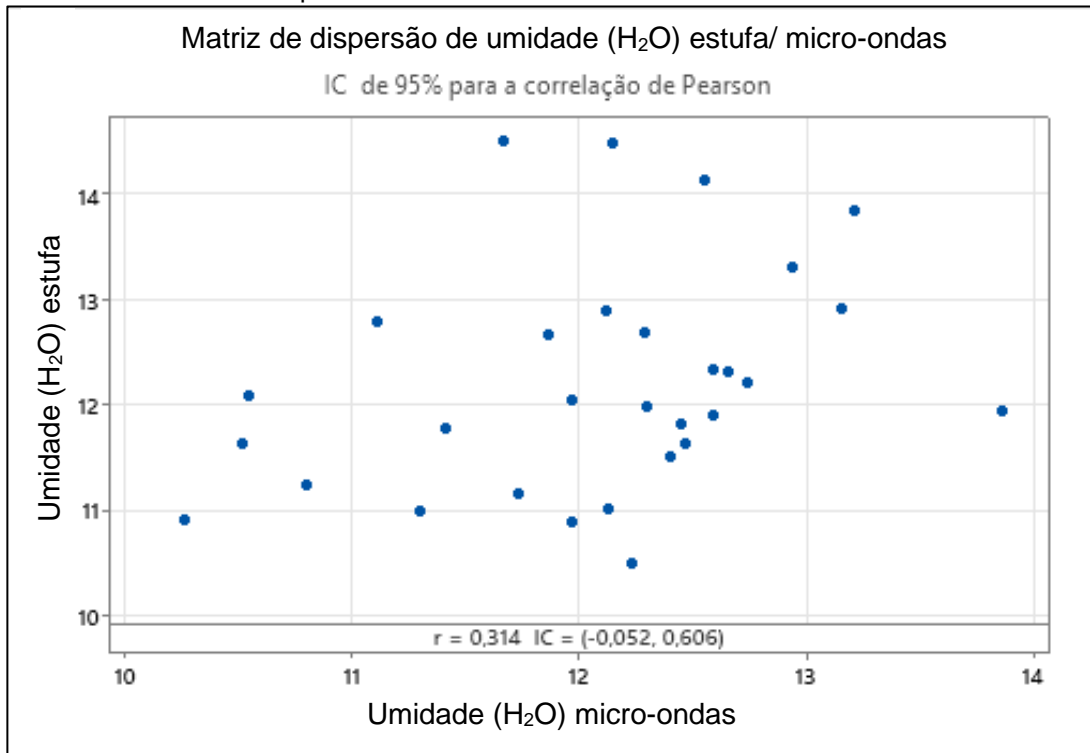
Fonte: Autor (2022).

Por fim, para esse conjunto de informações, foi feita a correlação gráfica e correlação de *Pearson* dos pares de dados (Estufa/Micro-ondas). A correlação de *Pearson* também é conhecida como r , é o método mais comum utilizado para as correlações de dados, ela mede a relação linear entre duas variáveis contínuas por uma série de variáveis que podem ser vistas na equação 4. Realizando essa análise no software Minitab, a correlação resultou em $r = 0,314$, visualizada no gráfico 7, bem como as análises gráficas dos dados, contidas nos gráficos 7 e 8.

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2)(\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (4)$$

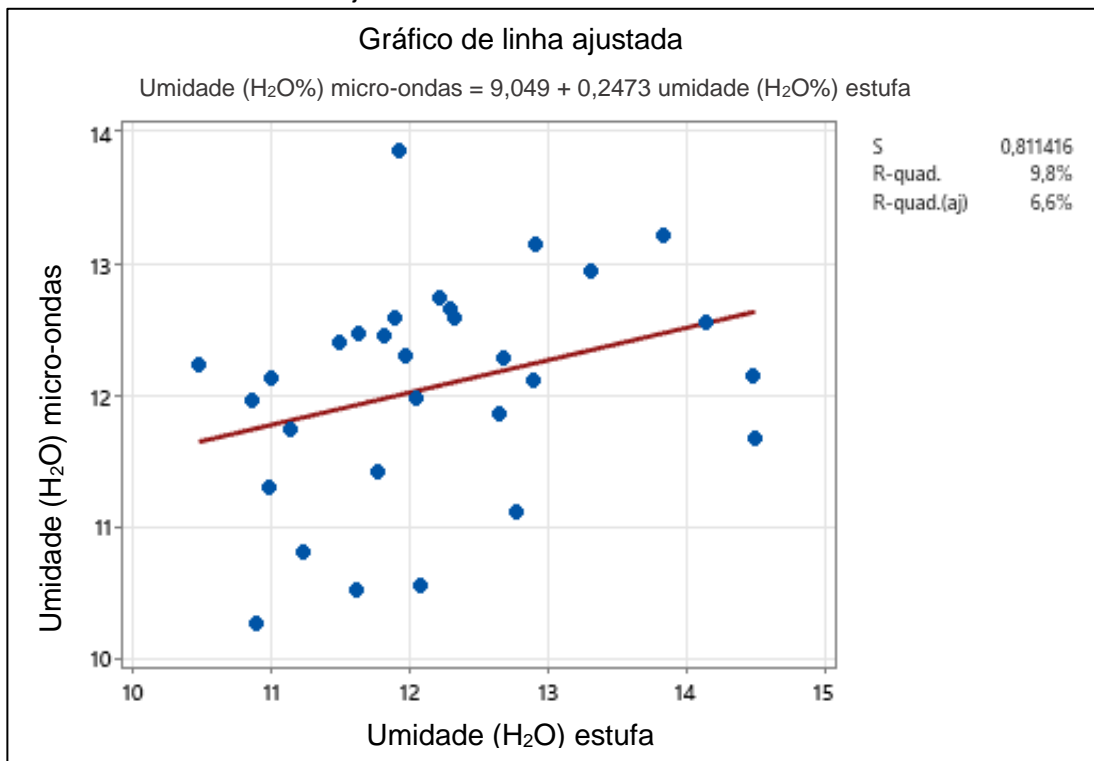
r = Correlação de *Pearson*.
 X_i = Valores das variáveis x .
 Y_i = Valores das variáveis y .
 \bar{x} = Média dos valores de x_i .
 \bar{y} = Média dos valores de y_i .
 Σ = Somatório dos valores.

Gráfico 7 - Gráfico de dispersão dos dados Estufa – Micro-ondas.



Fonte: Autor (2022).

Gráfico 8 - Gráfico de linha ajustada Estufa – Micro-ondas.



Fonte: Autor (2022).

Para o Gráfico 8, percebeu-se que a reta tem certa angulação no quadrante positivo, mostrando que os dados têm correlação positiva moderada ($r^2=6,6\%$), porém essa relação ainda é considerada insuficiente para análise de dados tão importantes quanto a umidade de um produto mineral, considerando que dentro da indústria se deve sempre buscar pela melhoria contínua de métodos. Então fez-se necessário analisar as correlações seguintes descritas no item 4.2, onde se pode verificar o comportamento dos três métodos analisados juntos, para de fato, afirmar qual o método que mais se aproxima do método da estufa, que nesse caso, é o parâmetro positivo. Para os dados a seguir, os incrementos foram feitos em triplicata em horários de coletas específicos para poder correlaciona-los de maneira a considera-los amostra única nas análises estáticas utilizadas.

4.2 Análises em amostras de secagem correlação estufa/micro-ondas/chapa

Para esse segundo conjunto de dados, foram analisadas 25 amostras testes de cada equipamento, ou seja, 75 incrementos, as fontes de aquecimento foram três: a **estufa**, como parâmetro de secagem (conforme norma), a **chapa** como método atual de secagem de controle prévio de umidade e o **micro-ondas** como método alternativo à chapa. Como dito anteriormente, essa nova fase de análises foi realizada para reafirmar a anterior descrita no item 4.1, bem como aferir a confiabilidade dos métodos estudados e suas respectivas correlações quando analisados em pares, porém dessa vez, os dados são referentes aos três métodos juntos e não dois, como a análise anterior.

Para início, foi feito os testes T pareado para ambas as correlações, estufa-micro-ondas e estufa-chapa, os valores utilizados estão contidos na tabela 7.

Tabela 7 - Estatísticas descritivas das amostras estufa/micro-ondas/chapa.

Amostra	N	Média	Desv. Pad.	Ep Média
H ₂ O Estufa	25	12,148	0,954	0,191
H ₂ O Micro	25	12,180	1,016	0,203
H ₂ O Chapa	25	10,961	0,954	0,191

N: Número de dados tratados; EP Média: Erro padrão de da média.
Fonte: Autor (2022).

A tabela 8 se refere aos dados utilizados no teste T, com relação as duas análises: estufa/micro-ondas e estufa/chapa. E tem o intuito de ajudar a visualizar com mais clareza qual método se comporta de maneira mais eficiente, quando se trata desse comparativo.

Tabela 8 - Estimativa da diferença pareada das amostras Estufa/Micro/Chapa.

Análise	Média	Desv. Pad.	Ep Média	IC de 95% da Diferença μ
Estufa-Micro	-0,129	1,131	0,206	(-0,551; 0,293)
Estuda-Chapa	-1,188	1,194	0,239	(-1,680; -0,695)

EP Média: Erro padrão de da média; Diferença μ : média da população de H₂O das correlações.
Fonte: Autor (2022).

O resultado do teste estufa/micro-ondas resultou em $p > 0,05$. Logo, se pode afirmar que as amostras são estatisticamente iguais, possibilitando seguir na análise para novas conclusões. A análise estufa-chapa sucedeu em $p < 0,05$, o que mostra nenhuma correlação quando se trata desses dados tratados. Afirmando então o que já suspeitávamos, no método do micro-ondas obtém-se resultados mais similares ao da estufa, quando comparados ao método da chapa. Abaixo temo as hipóteses aplicadas ao teste e os valores obtidos estão contidos na Tabela 9.

Hipótese nula H_0 : Diferença $\mu = 0$

Hipótese alternativa H_1 : Diferença $\mu \neq 0$

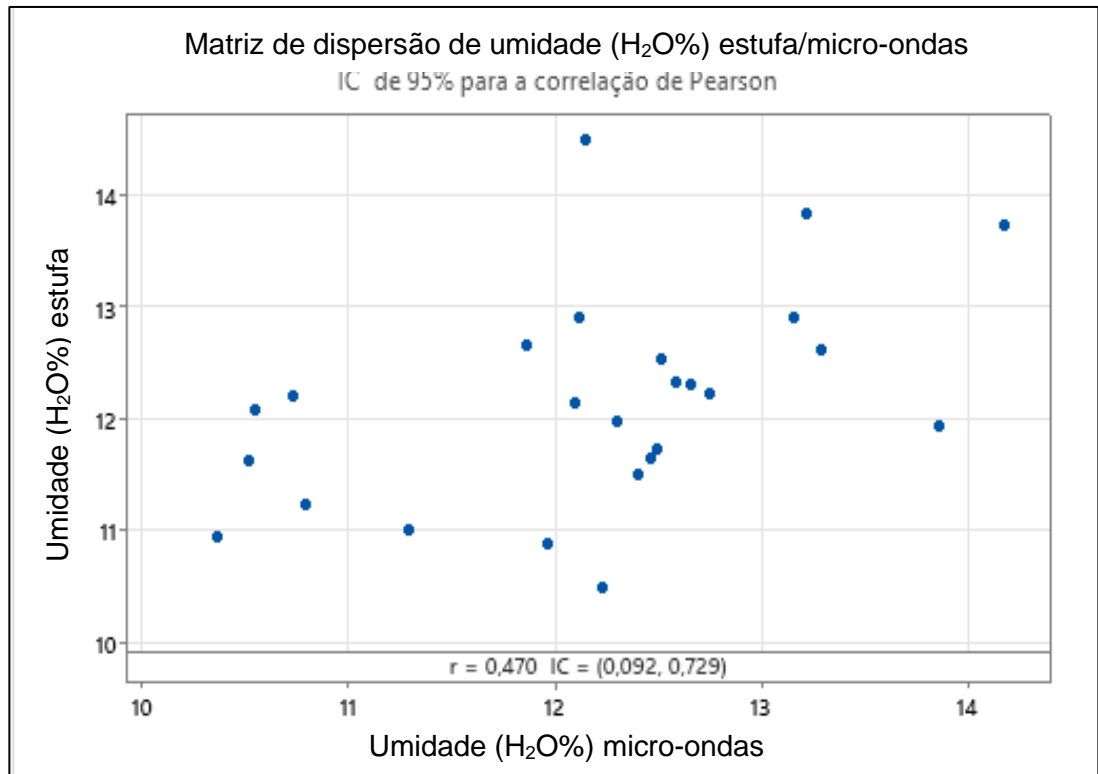
Tabela 9 - Estimativa da diferença pareada das amostras estufa-micro-chapa.

Análise	Valor - T	Valor - p
Estufa-Micro	0,15	0,879
Estuda-Chapa	-4,97	0,000

Fonte: Autor (2022).

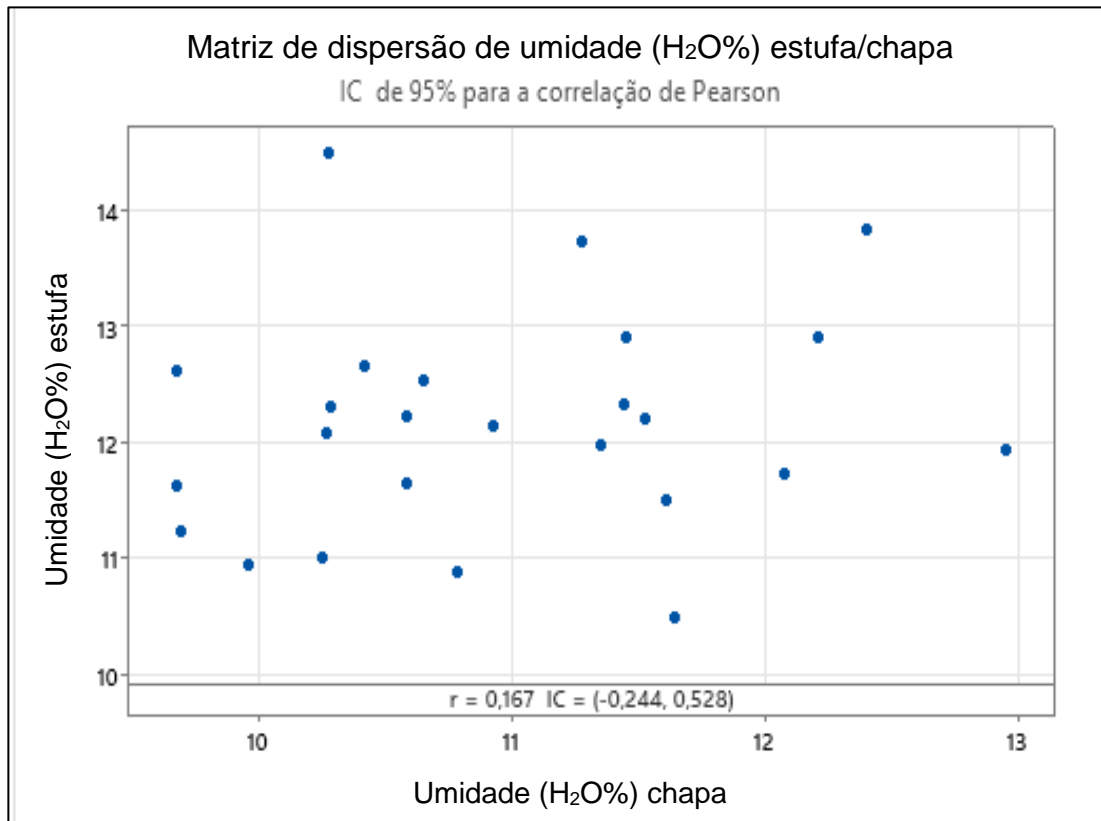
Para embasar com mais propriedade o que se concluiu anteriormente, nos gráficos 9 e 10 das correlações de *Pearson*, de ambas as análises se verificam resultados opostos, onde o gráfico 9 mostra melhor correlação estufa/micro-ondas ($r = 0,470$) relação positiva forte. Diferente dos dados da correlação estufa-chapa que resultou em $r = 0,167$, mostrando relação positiva moderada ou baixa (Gráfico 10).

Gráfico 9 - Gráfico de dispersão Estufa/Micro-ondas, análise 2.



Fonte: Autor (2022).

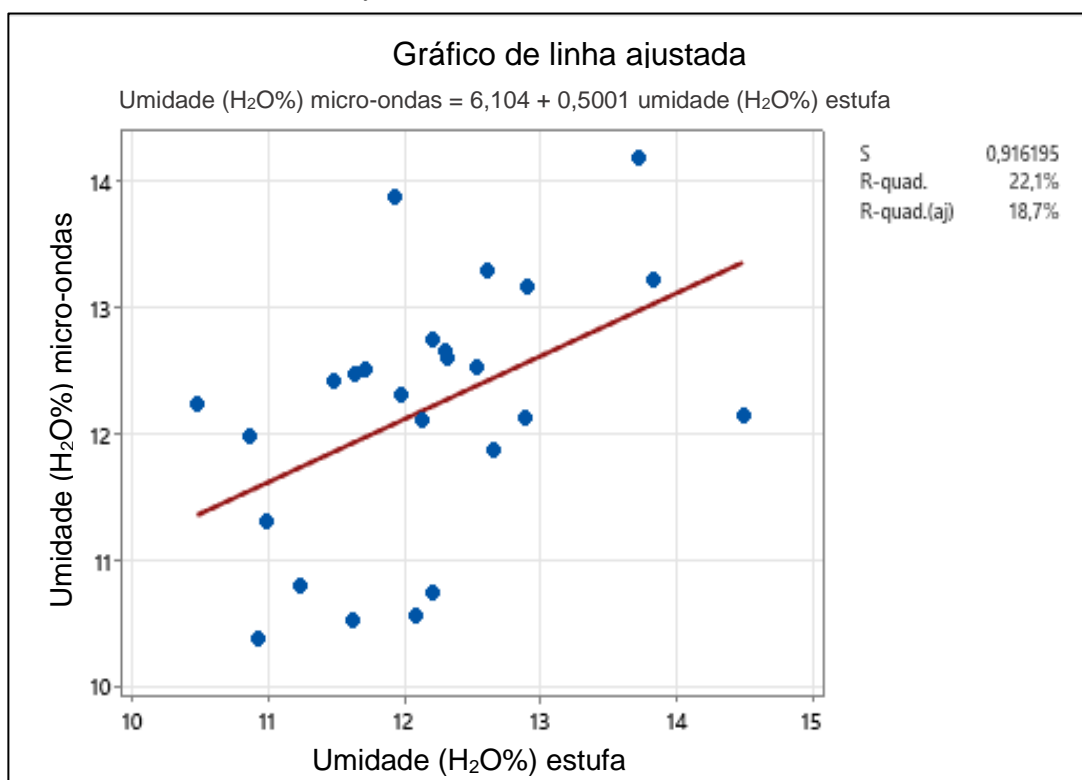
Gráfico 10 - Gráfico de dispersão Estufa/Chapa.



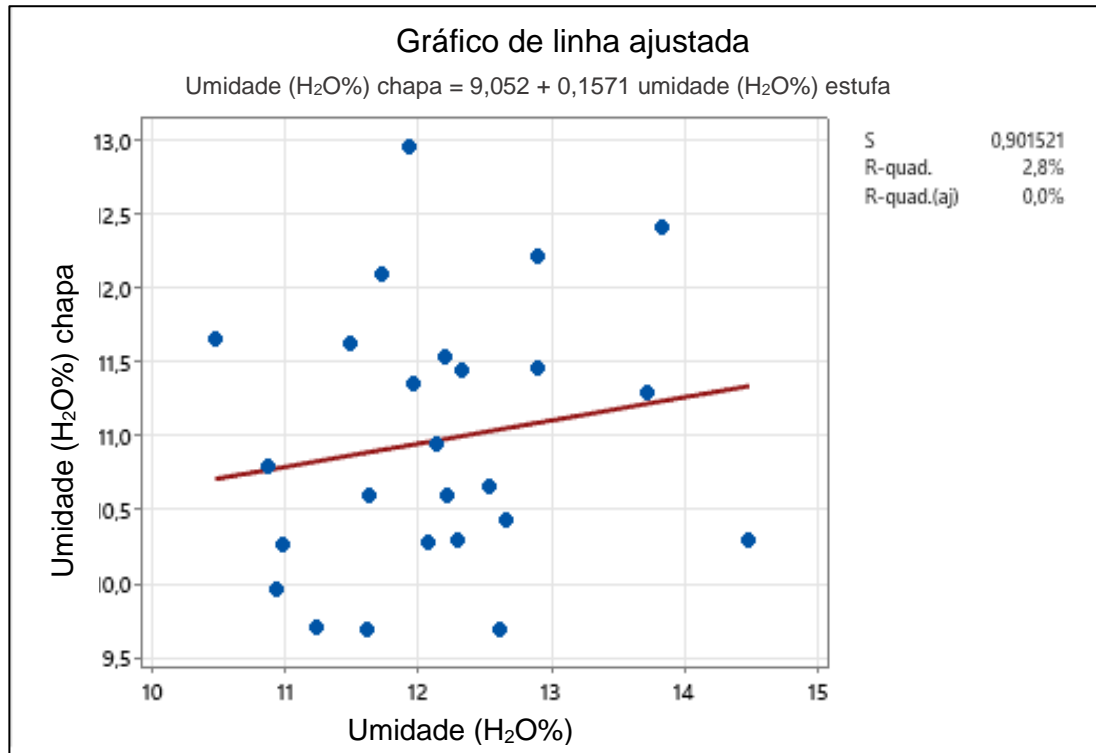
Fonte: Autor (2022).

Após realizar a análise de dispersão, os dados foram submetidos a análise de regressão linear, para verificar o coeficiente de angulação, como se pode conferir nos gráficos 11 e 12, a melhor regressão, ou seja, que resulta em maior similaridade entre métodos, é a do gráfico 11, onde o $r^2 = 22,1\%$ mostrando relação positiva. Já no gráfico 12, para a segunda correlação (estufa/chapa) o $r^2 = 2,8\%$, ou seja, próximo de 0%, o que significa que esses dois métodos quase não possuem relação, ou relação positiva moderada baixa, mostrando novamente a superioridade da correlação estufa-micro, o que possibilita afirmar que seria possível trocar o método de secagem em chapa para amostras de controle de processo, para o método de micro-ondas, pois além de resultar em uma secagem mais rápida, 50% mais, ágil, também resulta em melhor assertividade estatística quando se compara ao método da estufa.

Gráfico 11 - Gráfico de linha ajustada estufa/micro-ondas, análise 2.



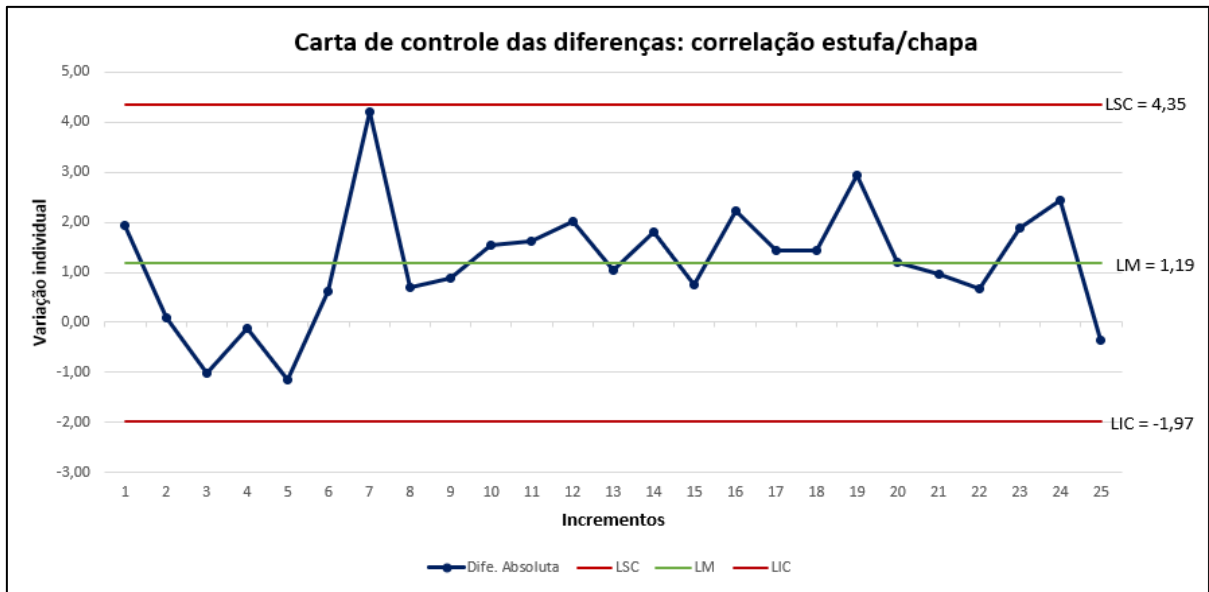
Fonte: Autor (2022).

Gráfico 12 - Gráfico de linha ajustada estufa – chapa, análise 2.2.

Fonte: Autor (2022).

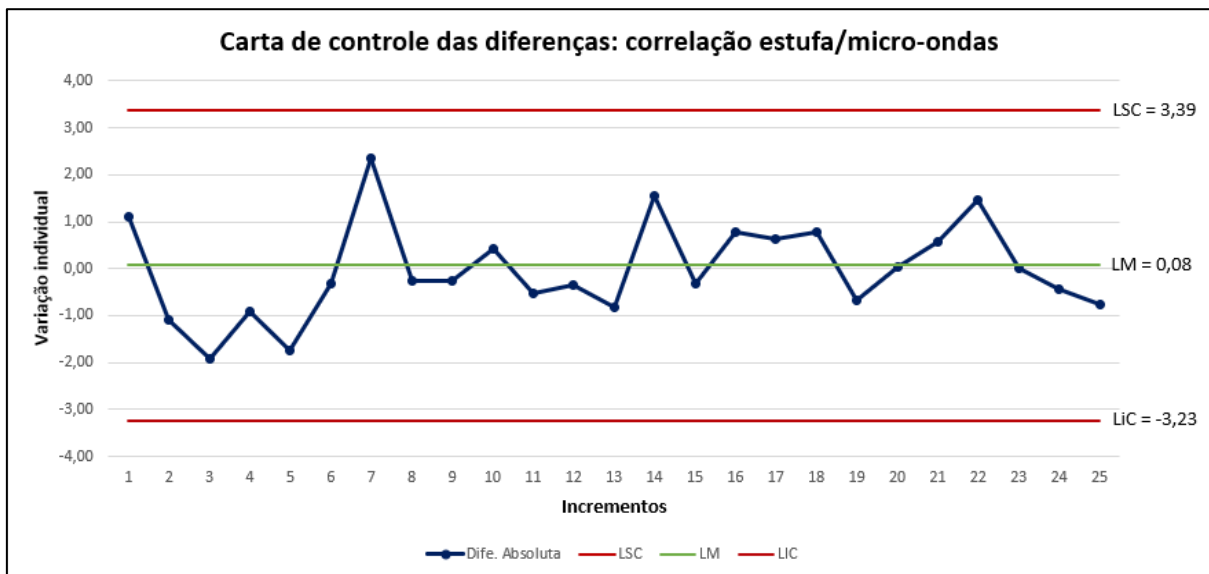
Por fim, uma última análise foi feita, a carta de controle das diferenças das variações de cada umidades dos testes. Essa análise foi realizada utilizando a ferramenta Excel com intuito de mostrar de forma clara e espacial padrões anormais na variabilidade de um processo, como se observa nos dados avaliados. Há maior intervalo de variação entre os métodos estufa/chapa, Gráfico 13, do que entre os métodos estufa/micro-ondas, gráfico 14, onde os limites superiores e inferiores (LSC e LIC) são mais espaçados mostrando a maior diferença entre os resultados quando visualizados um a um. Para a correlação estufa/chapa se tem um intervalo de variação de aproximada mente – 1,9 a +4,4 com média de 1,2 enquanto que na correlação estufa/micro-ondas se teve uma variação aproximada de -3,2 até +3,4, e média 0,08 o que mostra variação comportada sem muitas anormalidades o que possibilita prever resultados aproximados ao que se espera.

Gráfico 13 - Carta de controle dos métodos estufa/chapa.



Fonte: Autor (2022).

Gráfico 14 - Carta de controle dos métodos estufa/micro.



Fonte: Autor (2022).

Diante de todas essas informações, pode-se afirmar que de fato, a secagem em micro-ondas de minério granulado de bauxita lavada é bem mais efetiva que a secagem em chapa, resultando em mais agilidade na obtenção de teor de umidade. Informação extremamente relevante para o processo de lavagem da usina de beneficiamento mineral, pois com o resultado de umidade prévio de processo, pode-se ajustar a lavabilidade da planta, água de processo, tempo de exposição aos processos de peneiramento etc.

Outro ponto que se pode afirmar com esses testes, assim como afirmaram Magalhaes, Lima e Souza (2003) é que o tempo de secagem do minério de bauxita é diretamente proporcional à umidade da amostra, ou seja, quanto maior a umidade, maior o tempo de secagem.

Contudo, pode-se perceber uma melhora de 50% no ganho de tempo para secagem de incrementos granulados em micro-ondas de massa aproximada a 1kg, quando comparados com incrementos seco em chapa. Essas informações de umidade são utilizadas para estratégia de ajuste de equipamentos de lavagem e água de processo, bem como auxilia no controle de umidade do produto para que este possa ser vendido com informações e teores precisos estabelecidos pelo comprador, então é crucial que as respostas esperadas do produto sejam obtidas o mais breve possível.

5 CONCLUSÃO

Com este estudo foi possível identificar qual o método de secagem utilizado nas análises possui maior eficiência para obtenção de teor de umidade em menos tempo e melhor correlação com o método da estufa padronizado pela NBR 15858 (07/2010). Concluiu-se que o método de secagem em micro-ondas possui maior correlação com a estufa do que o método utilizado atualmente (método da chapa).

Para obtenção dos resultados, foi encontrado a massa mínima amostral para secagem de incrementos de bauxita para assim realizar este estudo de maneira assertiva (0,8 kg à 1 kg). Após isso, foi encontrado o tempo de secagem ótimo (30 min) por meio de testes e construção de curvas de secagens, resultando em ganho de tempo no processo. Por conseguinte, foi descoberto o melhor método de secagem correlato a estufa (método do micro-ondas), pelas análises de dados obtidos e tratados no Minitab e Excel. Por fim, foram validadas as informações para reafirmar as informações do procedimento de secagem existente dentro da empresa.

Concluindo, reitera-se que apesar de existirem processos tidos como excelentes, sempre há possibilidade de melhorá-los, cada vez que nos propomos a investigar um método a fundo e encontramos oportunidades de melhoria, o que nos permite tirar novas conclusões e contribuir com a comunidade científica.

Espera-se que este estudo contribua com outros pesquisadores que trilham por essa mesma linha de pesquisa, e ajude a melhorar mais ainda o processo de amostragem mineral, tornando mais visível essa área de estudo, que é tão carente hoje em dia. Vislumbra-se no futuro a possível construção de uma norma relacionada a outros métodos de secagem de minério de bauxita, assim como a existente para secagem de minério de ferro.

REFERÊNCIAS

ABAL, Associação brasileira do alumínio. **Bauxita no Brasil: Mineração responsável e competitividade**. São Paulo, 2017. Disponível em: http://www.abal.org.br/downloads/ABAL_Relatorio_Bauxita_2017_1.pdf. Acesso em: 21 jul. 2022.

ALBERGARIA, Gustavo Henrique de Castro. **Caracterização de perfil laterítico típico do platô Capiranga na mina de Bauxita Alcoa Juruti-PA**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia de Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 15858: Informação e documentação: Minérios de alumínio: Determinação de umidade: Método Gravimétrico**. Rio de Janeiro, 2010.

ALCOA, Controle de Qualidade. **Procedimento de atividade interna: ITI-OPE-642B-0006 - Fazer análise de umidade de granulados e preparação para a química**. Juruti, 2022.

ALCOA, Controle de Qualidade. **Procedimento de atividade interna: PGI-OPE-642B-0001- Amostragem de Minério Granulado**. Juruti, 2022.

ALCOA, Controle de Qualidade. **Procedimento de atividade interna: ITI-OPE-642B-0012 – Inspeccionar calibração da balança digital**. Juruti, 2022.

ALCOA, Controle de Qualidade. **Procedimento de atividade interna: ITI-OPE-642B-0013 – Secar amostra na chapa (minério fino e/ ou granulado)**. Juruti, 2022.

ALCOA, Controle de Qualidade. **Procedimento de atividade interna: ITI-OPE-642B-0015 – Usar a estufa**. Juruti, 2022.

ALCOA, Controle de Qualidade. **Procedimento de atividade interna: ITI-OPE-642B-0017 – Secar amostra no micro-ondas (minério fino e/ ou granulado)**, 2022.

ALCOA, Produção do beneficiamento e Processo. **Relatório de Secagem de amostras em micro-ondas para controle de qualidade**, 2011. Juruti, 2011. 14 p.

ALCOA, Estudos técnicos. **Secagem de amostras expeditas em micro-ondas para redução de tempo de secagem**. Juruti, 2019.

ANM, Agência Nacional de Mineração. **Anuário mineral brasileiro 2022 (ano base 2021) principais substâncias metálicas: produção bruta, beneficiada e comercializada**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2022.

ATHAYDE, Maycon. **Utilização de radiação micro-ondas para melhoria de controle de umidade de pelotas de minério de ferro**. 2019. 128 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

CONSTANTINO, Vera Regina Leopoldo; ARAKI, Koiti; SILVA, Denise de Oliveira; OLIVEIRA, Wanda. Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. **Revista Química Nova**, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 490-498, 2002.

DIAS, Leandro Gonçalves. **Estudo do processo de secagem em estufa e por Micro-ondas de compósitos cerâmicos de argila e resíduos de esteatito**, 2013. Dissertação (Pós-graduação) – Curso de pós-graduação em Engenharia da Energia, Departamento de Energia Mecânica, Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2013.

GOES, Maria Alice Cabral; POSSA, Mario Valente; LUZ, Adão Benvindo. **Amostragem de minérios**. 1 ed. Rio de Janeiro: Editora Eletrônica. 1991.

GOES, Maria Alice Cabral; POSSA, Mario Valente; LUZ, Adão Benvindo. Amostragem. In: LUZ, Adão Benvindo da. SAMPAIO, Alvez Sampaio. França, Sílvia Cristiana. **Tratamento de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. V. 5, cap. 2, p. 21-54.

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. **Produção de bauxita do oeste do Pará alavanca produção mineral**. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/producao-de-bauxita-do-oeste-do-para-alavanca-producao-nacional/>. Acesso em: 15 jun. 2022.

MAGALHÃES, Rodrigo Silva; LIMA, Rosa Malena Fernandes; SOUZA, Henor Artur. O uso do Micro-ondas para determinação de umidade de bauxita. In: ENTMME, 19., 2002. **Anais** [...]. Recife, 2002. p. 506-512.

MENDES, Anderso Conceição. TRUCKENBROD, Werner. NOGUEIRA, Afonso César Rodrigues. Análise faciológica da Formação Alter do Chão (Cretáceo, Bacia do Amazonas), próximo à cidade de Óbidos. **Revista Brasileira de Geociências**, Pará, p. 39–57. Mar. 2012.

SANTOS, Ana Carolina. **Amostragem no tratamento de minérios: Uma revisão bibliográfica**, 2015. 34 f. monografia (pós-graduação) – Pós-graduação em Tratamento de Minérios, Universidade Federal de Goiás, Goiás. 2015.

SAMPAIO, João Alves. ANDRADE, Mônica Calixto. DUTRA, Achilles Junqueira Boudort. Bauxita. In: LUZ, Adão Benvindo da. LINS, Fernando Antônio Freitas. **Rochas e Minerais Industriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. cap. 13, p. 279-304

SIMINERAL, Sindicato das Indústrias Mineraias do Estado do Pará. **Mineração no Pará, Brasil e mundo**. Pará: Nazaré, 2022. Disponível em: <https://simineral.org.br/mineracao/mineracao-para>. Acesso em: 9 jun. 2022.

KRÜGER, Fernando Leopoldo Von. **Redução da umidade de minério de ferro com o emprego de Micro-ondas**. 1997. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.