

**BÁRBARA FIORITO**

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE SECAGEM PARA A  
DETERMINAÇÃO DA UMIDADE EXPEDITA DE BAUXITA**

Trabalho de Formatura em Engenharia de Minas do  
curso de graduação do Departamento de  
Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ana Carolina  
Chieregati

Co-orientador: Gustavo Ferreira Correia

São Paulo  
2018

**BÁRBARA FIORITO**

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE SECAGEM PARA A  
DETERMINAÇÃO DA UMIDADE EXPEDITA DE BAUXITA**

São Paulo  
2018

TF-2018

F573c

Sysno 2929071

H2018r



Escola Politécnica - EPMI



31700000183

Catalogação-na-publicação

Fiorito, Bárbara

Comparação de métodos de secagem para a determinação da umidade expedita de bauxita / B. Fiorito -- São Paulo; 2018.  
29 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.Bauxita 2.Umidade expedita 3.Umidade oficial I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço à equipe do laboratório da mina de Juruti da Alcoa pelo apoio, ensinamentos e pela disponibilização dos recursos necessários para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Gustavo Correia e à Alcoa que viabilizaram e incentivaram a realização da pesquisa.

À professora Ana Carolina, que acompanhou a elaboração deste trabalho.

Agradeço especialmente meus pais, Robson e Cláudia, que nunca mediram esforços para me ajudar. Ao Eduardo, meu companheiro em todos os momentos.

## RESUMO

A quantificação da umidade oficial de um embarque de bauxita é de extrema relevância tanto para as empresas mineradoras quanto para os clientes. Do ponto de vista de segurança, o conhecimento e controle da umidade do minério permite que decisões acerca do armazenamento, manuseio e meio de transporte sejam tomadas visando à integridade dos trabalhadores que estão diretamente envolvidos nestas atividades. Já pelo lado do cliente, o interesse é adquirir bauxita, arcando com o custo do produto e não da água nele contida. A normativa internacional descreve uma série de procedimentos para determinar o valor da umidade oficial do minério embarcado, de maneira que tal resultado só é obtido horas após o completo carregamento do navio. Assim, o tempo hábil para a tomada de ações que visem a correção da umidade a ser embarcada é substancialmente reduzido. Como ferramenta de controle de processo, as empresas mineradoras adotam, portanto, outros métodos para estimar a umidade oficial antes de completar o embarque, gerando os resultados chamados de “umidade expedita”. O presente trabalho apresenta o estudo de diferentes métodos de secagem de bauxita para a determinação da umidade expedita, visando à aplicação do procedimento na operação da Alcoa em Juruti (PA), Brasil. Os resultados obtidos pelo atual método de secagem em chapa aquecida no local foram comparados com aqueles da mina de Huntly (WA), na Austrália, em que se utiliza o analisador de umidade infravermelho para quantificação da umidade expedita. Além disso, foram realizados ensaios com a bauxita de Juruti simulando novas amostragens para coleta das porções expedita e oficial e secagem em estufa para verificação da representatividade e comportamento do material.

**Palavras-chave:** bauxita, umidade expedita, umidade oficial.

## ABSTRACT

The quantification of the official moisture of bauxite's shipments is of extreme relevance for both mining companies and customers. From a safety point of view, the knowledge and control of the ore's moisture allows decisions about the storage, handling and means of transport to be taken aiming at the integrity of the workers who are directly involved in these activities. On the customer's side, the interest is to acquire bauxite, paying for the product and not for its contained water. The international regulation describes a series of procedures to determine the value of the official moisture of the shipped ore, so that such result is only obtained hours after the vessel has been fully loaded. Thus, the available time to take actions aimed at correcting the moisture content of the load is substantially reduced. As a process control tool, mining companies therefore use other methods to estimate official moisture before completing shipment, generating the so-called "expedite moisture". This work presents the study of different bauxite drying methods for the determination of the expedite moisture, aiming at the application of the procedure at Alcoa's operation in Juruti (PA), Brazil. The results obtained by the current on-site heated plate drying method were compared to those of the Huntly mine (WA), Australia, where the Infra-Red moisture analyzer is used for quantification of the expedite moisture. In addition, experiments were carried out using Juruti's bauxite for simulation of new sampling procedures for collection of the expedite and the official portions and oven drying to verify the representativeness and behavior of the material.

**Key-words:** bauxite, expedite moisture, official moisture.

## **LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

Figura 1 - Fenômeno de liquefação em carregamentos de minérios. ....	4
Figura 2 - Fenômeno da separação dinâmica em carregamentos de minérios.....	4
Figura 3 - Sentido do fluxo de calor em diferentes processos de secagem. ....	6
Figura 4 - Ilustração da tomada de amostras $A_{kj}$ e $B_{kji}$ do embarque 1. ....	8
Figura 5 - Amostra A. ....	9
Figura 6 - Preparação amostra B <sub>1</sub> . ....	9
Figura 7 - Amostra B <sub>1</sub> . ....	9
Figura 8 - Correlação umidade expedita e oficial por embarque. ....	12
Figura 9 - Correlação umidade expedita e oficial por incremento. ....	12
Figura 10 - Correlação umidade amostras B <sub>1</sub> e B <sub>2</sub> por embarque. ....	13
Figura 11 - Correlação umidade amostras B <sub>1</sub> e B <sub>2</sub> por incremento. ....	13
Figura 12 - Correlação umidade amostras B <sub>1</sub> e B composta por embarque. ....	14
Figura 13 - Correlação umidade amostras B <sub>1</sub> e B composta por incremento. ....	14
Figura 14 - Gráfico teor av.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> embarque 2. ....	16
Figura 15 - Gráfico teor re.SiO <sub>2</sub> embarque 2. ....	16
Figura 16 – Correlação entre umidade oficial (estufa) e expedita (infravermelho) por embarque. ....	17
Figura 17 - Correlação entre umidade oficial (estufa) e expedita (infravermelho) por incremento. ....	18

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Reserva e produção mundial de bauxita em 2016.....	3
Tabela 2 - Umidade de bauxita obtida por diferentes métodos de secagem.....	11
Tabela 3 - Estatísticas dos dados de umidade.....	11
Tabela 4 -Teores dos diferentes incrementos de bauxita do embarque 2.....	15
Tabela 5 - Média e devio padrão dos dados de análise química .....	15
Tabela 6 - Umidade de bauxita obtida por secagem em infravermelho. ....	17
Tabela 7 - Média e desvio padrão dos dados de umidade da Austrália .....	17
Tabela 8 -Umidade de bauxita australiana prevista a partir dos dados de secagem em infravermelho. ....	18

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1. Objetivo .....	1
2. Revisão Bibliográfica .....	2
2.1. Cenário econômico.....	2
2.2. Transporte marítimo de cargas sólidas a granel.....	3
2.3. Determinação da umidade da bauxita .....	5
2.4. Métodos de secagem para determinação da umidade expedita .....	6
3. Materiais e Métodos .....	8
3.1. Bauxita amazônica .....	8
3.2. Bauxita australiana .....	10
4. Resultados.....	11
4.1. Bauxita amazônica .....	11
4.1.1. Umidade: Estufa e Chapa Aquecida .....	11
4.1.2. Análise Química .....	14
4.2. Bauxita australiana .....	16
4.2.1. Umidade: Estufa e equipamento infravermelho .....	16
5. Conclusões.....	19
5.1. Bauxita amazônica .....	19
5.2. Bauxita australiana .....	19
6. Referências .....	20

## **1. Introdução**

A normativa internacional para embarques de bauxita exige que a umidade oficial do minério transportado pelo navio seja determinada seguindo suas especificações de amostragem, tempo e equipamento de secagem, granulometria e massa de material. Neste trabalho, são estudados os aspectos operacionais das minas de bauxita de Juruti, no Brasil e de Huntly, na Austrália, ambas da Alcoa. Nessas operações, o procedimento executado para a determinação da umidade oficial é incremental, leva 14 horas para a secagem de cada um dos 50 incrementos coletados, em média, por embarque, e o valor final de umidade da bauxita embarcada é obtido após a conclusão do carregamento.

Portanto, para permitir que a mina corrija a umidade do minério durante a operação de carregamento, garanta a segurança do transporte marítimo e auxilie no controle de qualidade do processo, as empresas de mineração de bauxita adotam métodos alternativos para estimar a umidade de maneira mais rápida. Esse parâmetro é chamado de “umidade expedita” e é determinado, na maioria das minas de bauxita no Brasil, a partir da secagem em chapas aquecidas.

Ao longo do trabalho são apresentados os resultados dos ensaios de secagem e análise química da bauxita amazônica paraense brasileira e são analisados dados de umidade oficial e expedita da bauxita australiana.

### **1.1. Objetivo**

O objetivo deste estudo é sugerir outros métodos de secagem mais rápidos e simples para a obtenção da umidade expedita, prever com mais precisão e acurácia a umidade oficial da bauxita embarcada e, assim, garantir a manutenção da segurança do transporte marítimo e fluvial do produto.

## 2. Revisão Bibliográfica

Segundo Sampaio et al. (2005) a bauxita é uma rocha de coloração avermelhada e é fonte natural de alumínio, que se encontra em maior ocorrência combinado com outros elementos, principalmente com oxigênio, com o qual forma alumina. Os minerais de alumínio mais importantes na constituição da bauxita são gibbsita:  $Al(OH)_3$ , diáspero:  $AlO(OH)$  e boehmita:  $AlO(OH)$ .

A bauxita, descoberta em 1821 por Berthier, tem seu nome inspirado na localidade em que foi primeiramente encontrada, Les Baux, no sul da França (Sampaio et al. 2005). Utilizada inicialmente na indústria têxtil, a alumina que era extraída da bauxita através do Processo de Le Chatelier, passou a ter mais aplicações na indústria metalúrgica com o desenvolvimento do processo Hall-Héroult, em 1886. A produção de alumínio metálico a partir da alumina aproveitável simbolizou um grande avanço para a metalurgia, principalmente quando, em 1888, associou-se ao Processo Bayer, permitindo que a eletrólise da alumina fosse mais eficiente em termos energéticos e econômicos.

Atualmente, a bauxita apresenta também diversos usos não metalúrgicos, como a fabricação de produtos abrasivos, refratários e químicos, além da produção do alumínio metálico.

### 2.1. Cenário econômico

As reservas mundiais de bauxita são avaliadas em 28 bilhões de toneladas (DNPM, 2015), sendo as principais localizadas na Guiné e Austrália. O Brasil, por sua vez, apresenta grande relevância no cenário global de reservas e de produção de bauxita. Como apresentado na Tabela 1, o Brasil ocupa a terceira posição tanto na posse de depósitos quanto na produção beneficiada anual, segundo *ranking* de 2015, contribuindo com 13% da produção mundial.

O Anuário Mineral Brasileiro de 2017, atualizou a quantidade de bauxita beneficiada no país para cerca de 37,6 Mt, responsável por um valor arrecadado com essa venda de R\$ 3,4 bilhões, em 2016. Nesse mesmo ano, o Estado do Pará se apresentou como líder produtor nacional, responsável por 35,2 Mt de bauxita, que corresponde a mais de 93% da produção brasileira (DNPM, 2016). Esse estado é também o maior exportador de bauxita do Brasil, sendo as principais mineradoras da localidade a Mineração Rio do Norte (MRN), Mineração Paragominas e a Alcoa.

Tabela 1 - Reserva e produção mundial de bauxita em 2016.

Discriminação	Reservas (10 <sup>6</sup> t)	Produção (10 <sup>3</sup> t)		
		2014	2015	(%)
Países	2015	2014	2015	(%)
Brasil	2.600	34.376	35.715	13,00
Austrália	6.200	78.600	80.000	29,12
China	830	55.000	60.000	21,84
Malásia	40	3.260	21.200	7,72
Índia	590	16.500	19.200	6,99
Guiné	7.400	17.300	17.700	6,44
Jamaica	2.000	10.700	10.700	3,89
Rússia	160	6.600	6.600	2,40
Cazaquistão	200	5.200	5.200	1,90
Outros	7.980	17.040	18.400	6,70
<b>TOTAL</b>	<b>25 694</b>	<b>257 420</b>	<b>257 917</b>	<b>100,00</b>

Fonte: DNPM/DIPLAM; USGS – Mineral Commodity Sumaries - 2016

Segundo dados do IBRAM (2012), cerca de 6,9 Mt de bauxita foram exportadas, sendo que números atualizados pela ABAL (2016), em 2014, apresentam um aumento expressivo, chegando a 8,4 Mt em exportação. A crescente demanda mundial por bauxita, em decorrência do uso de alumínio, é regida especialmente à necessidade da China, que nos últimos anos levou, entre diversos aspectos, a um consequente aquecimento do mercado de navegação.

## 2.2. Transporte marítimo de cargas sólidas a granel

No âmbito da segurança do transporte marítimo da bauxita, existe uma rígida regulação em vigor. O transporte marítimo de cargas a granel é regulamentado internacionalmente pela Organização Marítima Internacional (IMO). Com objetivo de definir critérios para a segurança das operações, a IMO estabeleceu em 1965 o Código Marítimo Internacional de Cargas Sólidas a Granel (IMSBC Code) (FERREIRA et al. 2017). Desde então, esta é a principal legislação internacional que rege a segurança do transporte marítimo de bauxita. Suas regras têm caráter mandatório no Brasil desde 2011 (IMSBC, 2008).

Dentre seus objetivos, o IMSBC visa facilitar o acondicionamento e o embarque seguro das cargas sólidas a granel, provendo informação quanto ao risco associado com o embarque de certas cargas e aos procedimentos a serem adotados no

embarque. Uma das principais ações de segurança que impactam diretamente a indústria de mineração é a determinação do limite transportável de umidade (*transportable moisture limit: TML*). O conceito foi formalizado em 1965 pela IMO e se refere ao limite máximo de umidade que uma carga de materiais sólidos a granel pode apresentar e ainda ser considerada segura de ser transportada via marítima. A determinação do TML visa garantir, sobretudo, que o fenômeno de liquefação e/ou de separação dinâmica não comprometa o transporte da carga.

O fenômeno da liquefação de materiais granulares, ilustrado na Figura 1, consiste na transformação do estado sólido ao estado líquido devido a um aumento de poro-pressão da água e redução da tensão efetiva entre as partículas sólidas, decorrente da busca aplicação de uma carga de origem estática ou dinâmica. A compactação da carga leva a uma redução dos espaços entre as partículas e o material granular liquefeito passa a se comportar como um líquido viscoso (FERREIRA et al. 2017).



Figura 1 - Fenômeno de liquefação em carregamentos de minérios.

Fonte: AMSA, 2018.

Já a separação dinâmica, ilustrada na Figura 2, ocorre durante o transporte de minérios no momento em que a água da carga migra para a superfície do porão, na medida em que o material é comprimido devido à vibração e ao movimento do navio. A compactação ocorre quando o material transportado é constituído por uma grande quantidade de partículas finas que impedem a drenagem da água (AMSA, 2018).



Figura 2 - Fenômeno da separação dinâmica em carregamentos de minérios.

Fonte: AMSA, 2018.

### **2.3. Determinação da umidade da bauxita**

Para atender a especificação normativas, portanto, faz-se necessário seguir demorados procedimentos de amostragem e secagem para determinar o valor de umidade oficial do carregamento de bauxita. Esta umidade é resultado da ponderação das massas e umidades dos incrementos coletados pela torre de amostragem durante o carregamento do navio, a partir de amostragem sistemática, onde os incrementos são coletados a intervalos regulares, definidos *a priori* (Luz et al. 2010). Nas minas de referência adotadas para este trabalho, cada incremento coletado apresenta cerca de 3 kg e é seco em estufa durante 14 horas. Assim, o valor de umidade que será usado para comparação ao TML é conhecido apenas após o completo carregamento e a saída do navio.

Devido à delonga para se conhecer o resultado de umidade oficial, empresas de mineração que transportam seus produtos por vias fluvial e marítima adotam métodos alternativos de amostragem e secagem para se ter uma noção prévia da umidade da bauxita que está sendo embarcada. Tal medida adicional, que resulta no valor da umidade expedita, visa ampliar o tempo de ação para a correção de umidade de pilhas e a adequação ao TML, como discutido anteriormente.

Atualmente, utiliza-se no Brasil como método de secagem alternativo à estufa, a secagem de amostras de bauxita em chapa aquecida. Para cada incremento que será utilizado para a secagem em estufa, é retirada também uma amostra proveniente de um corte adicional do amostrador na torre de amostragem para secagem em chapa aquecida. Na operação de Juruti estudada neste trabalho, a massa de cada amostra de bauxita é de aproximadamente 500 g e o tempo de secagem em chapa é de 1 hora.

Em Huntly, por outro lado, o método de secagem para a determinação da umidade expedita é a partir de um equipamento de infravermelho. A massa de cada amostra de bauxita coletada para tal finalidade é de, aproximadamente, 50 g e o tempo de secagem é de 20 minutos.

Inspirando-se na diferença entre os métodos de secagem de Juruti e Huntly, este trabalho apresenta uma comparação entre a secagem de bauxita em estufa, chapa aquecida, equipamento de infravermelho e de micro-ondas, no âmbito da

determinação da umidade expedita de carregamentos de bauxita, visando à recomendação de utilização dos métodos mais eficazes e rápidos.

#### 2.4. Métodos de secagem para determinação da umidade expedita

A secagem da bauxita para a determinação da umidade oficial dos carregamentos é realizada em uma estufa, que consiste em uma câmara de isolamento térmico apropriado e com sistemas de aquecimento e ventilação do ar circulante sobre ou através das bandejas. Neste tipo de secador o produto é colocado em bandejas, ou outros acessórios similares, sendo exposto a uma corrente de ar quente em ambiente fechado (DIAS, 2013 apud FELLOWS, 2006). A transferência de calor por meio da convecção entre um fluido e um sólido faz com que o ar aquecido por uma fonte de energia - transfira calor para a superfície sólida do produto a ser seco. O gradiente de temperatura entre esta superfície aquecida e o centro do material provoca, então, a troca de calor entre estas duas regiões por condução térmica. Segundo Magalhães (2002) a técnica de secagem de bauxita em estufa é lenta devido ao sentido em que o fluxo de calor é propagado, de fora para dentro das partículas do sólido. A secagem em chapa aquecida é regida pelo mesmo princípio de fluxo de calor da estufa, como ilustrado na Figura 3.

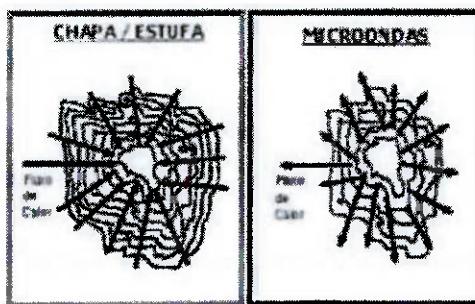


Figura 3 - Sentido do fluxo de calor em diferentes processos de secagem.

Fonte: MAGALHÃES, 2002.

Magalhães (2002) descreve também outro método de secagem, por equipamento infravermelho. Segundo ele, o material, em geral, absorve a radiação em uma estreita camada na superfície e, portanto, para se obter resultados efetivos, utiliza-se pouca massa para esta análise. O equipamento pode ser programado para concluir a secagem quando a massa pesada for constante ou por definição de tempo. A prática sugere que, para amostras de bauxita, quando feita a opção por secagem até a ausência de variação de massa, o processo é completo em menos de 30 minutos e a massa usada no estudo não é destruída, podendo ser reaproveitada para análises posteriores.

A radiação infravermelha aplicada na secagem de minérios apresenta, portanto, a vantagem de aquecer diretamente o produto exposto, com poucas perdas por aquecimento do ar circundante, promovendo maior eficiência energética e a redução do tempo de secagem.

Além disso, a análise on-line infravermelha executa medições rápidas e contínuas que podem ter seus dados extraídos de maneira automatizada para computador, abastecendo uma base de dados, muitas vezes permitindo melhorias no controle do processo. Dados em tempo real fornecem *feedback* imediato ao controle de processo (Engström et al., 2018 apud Kurth, 2016).

Os equipamentos de secagem infravermelho também são conhecidos como analisadores de umidade. Estes funcionam nos moldes do princípio da termogravimetria, ou seja, o peso inicial da amostra é registado e a partir de um elemento de aquecimento que promove a secagem do material, o equipamento registra continuamente o peso da amostra. A perda total de peso é interpretada como o teor de umidade. Tal elemento de aquecimento pode ser constituído por um radiador infravermelho convencional ou por um tubo de vidro preenchido com gás halogênio. O analisador de umidade de halogênio é uma evolução do equipamento infravermelho convencional, pois permite que a potência máxima atingida na secagem seja mais elevada e alcançada de maneira mais rápida e controlável (METTLER-TOLEDO, 2013).

Em relação ao emprego de equipamentos de micro-ondas para a determinação da umidade alternativa de bauxita, são encontradas diversas referências descrevendo ensaios realizados na indústria mineral. Magalhães et al. (2003) definem as micro-ondas como radiações eletromagnéticas não ionizantes, derivadas da energia elétrica. De acordo com Metaxas e Meredith (1983), em processos de secagem de materiais em fornos de micro-ondas, o principal fenômeno responsável pelo aquecimento e consequente extração da água dos produtos é a rotação dipolar, provocada pela absorção direta da energia pelo material a ser aquecido. Tal ocorrência deve-se à resistência encontrada para a rotação do dipolo elétrico da molécula polar da água, que resulta em dissipação de energia eletromagnética do campo sob a forma de calor, gerando aumento de temperatura do material e sua secagem.

### 3. Materiais e Métodos

#### 3.1. Bauxita amazônica (PA – Brasil)

A coleta das amostras de bauxita amazônica de 3 embarques consecutivos foi realizada entre os dias 10 e 16 de janeiro de 2018. A cada 1.000 t de bauxita embarcadas, 4 cortes foram feitos pelo amostrador automático localizado na torre de amostragem do porto, que antecede o embarque de material nos navios. Os incrementos do primeiro corte foram secos em estufa seguindo o procedimento especificado na norma para determinação da umidade oficial do carregamento. Já os incrementos do segundo corte foram secos em chapa aquecida para determinação da umidade expedita. Para a realização deste trabalho foram adicionados, excepcionalmente, outros 2 cortes no amostrador para coletar incrementos a serem usados neste estudo. Considerando que cada embarque carregava cerca de 50.000 t, cada um dos 3 embarques gerou 50 pares de amostras para os ensaios.

Cada par de amostras foi constituído de porções denominadas  $A_{kj}$  e  $B_{kj}$ , de 3 a 4 kg cada, sendo  $k$  a numeração do embarque (de 1 a 3),  $j$  o incremento da amostra no embarque (de 1 a 50) e  $i$  a porção quarteada (1 ou 2), por exemplo  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ ,  $B_{111}$ ,  $B_{112}$  e assim por diante. A Figura 4 ilustra o exemplo da nomeação das amostras do embarque 1.

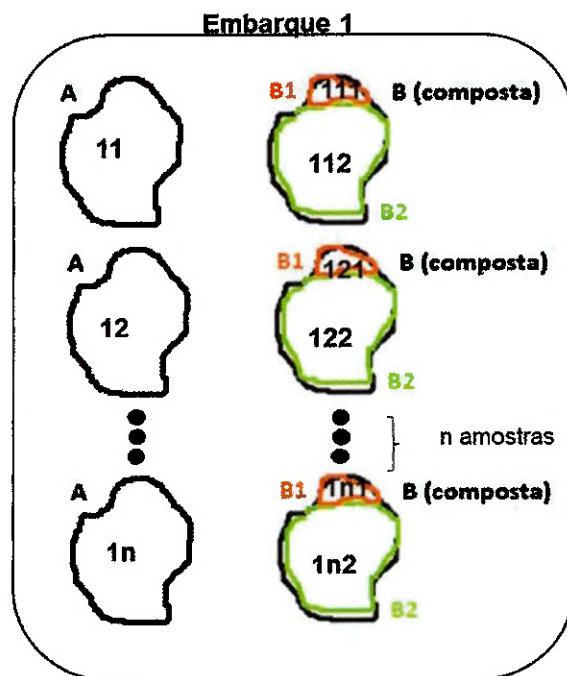


Figura 4 - Ilustração da tomada de amostras  $A_{kj}$  e  $B_{kj}$  do embarque 1.  
Fonte: autoria própria.

Enquanto as amostras  $A_{kj}$  foram pesadas em bandeja e seguiram para a estufa sem nenhuma etapa de redução, como ilustrado na Figura 5, as amostras  $B_{kj}$  foram homogeneizadas e reduzidas a partir do quarteamento com espátulas de metal em cerca de 1/8 da pilha formada e, em seguida, 1/3 da base da fatia foi amostrado novamente usando as espátulas, conforme Figura 6.



Figura 5 - Amostra A.  
Fonte: arquivo pessoal da autora.



Figura 6 - Preparação amostra B<sub>1</sub>.  
Fonte: arquivo pessoal da autora.

Esta parte retirada em vidro de relógio, ilustrada em destaque nas Figuras 6 e 7, corresponde a aproximadamente 1/24 da massa da pilha inicial, denominada no trabalho de  $B_{kj1}$ , pesada em balança, obtendo-se uma massa de bauxita entre 60 e 100 g e encaminhada para a secagem em estufa. O restante do material, 23/24 da massa inicial, referido como  $B_{kj2}$ , foi novamente homogeneizado e pesado em bandeja antes da secagem em estufa.



Figura 7 - Amostra B<sub>1</sub>.  
Fonte: arquivo pessoal da autora.

As amostras  $A_{kj}$  foram, portanto, utilizadas como grupo de controle para as comparações neste estudo, pois apresentam as mesmas características (amostragem e secagem em estufa) das amostras utilizadas para determinar a umidade oficial da bauxita embarcada nos navios.

O peso das amostras determinado antes da secagem foi chamado de “peso úmido” e, após a secagem, “peso seco”, de maneira que a umidade foi calculada a partir da equação:

$$Umidade_i = \frac{(Peso\ Úmido_i - Peso\ seco_i)}{(Peso\ Úmido_i - Peso\ da\ Bandeja_i)} \times 100\% \quad (\text{Equação 1})$$

Após determinada a umidade em base úmida de cada uma das amostras  $A_{kj}$  e  $B_{kj}$ , foi feita análise química para a determinação dos teores de alumina aproveitável (av. $Al_2O_3$ ) e sílica reativa (re. $SiO_2$ ), para um dos embarques. Foram tomadas as amostras A e B dos 30 primeiros incrementos do embarque número 2 para esta análise.

### 3.2. Bauxita australiana

Para o estudo de secagem em equipamento infravermelho, foram cedidos os dados dos ensaios elaborados pela equipe da Alcoa na Austrália.

A coleta das amostras de bauxita foi feita por 15 embarques consecutivos. A cada 1.000 t de bauxita embarcadas, 2 cortes foram executados pelo amostrador automático da torre de amostragem do porto da mina de Huntly, que antecede o embarque de material nos navios. Em média, 45 incrementos foram coletados por embarque para cada tipo de secagem. Os incrementos do primeiro corte foram secos em estufa para determinação da umidade oficial, seguindo o procedimento normativo descrito anteriormente. Já os incrementos do segundo corte foram amostrados de maneira aleatória, coletando cerca de 50 g, para secagem em equipamento infravermelho e determinação da umidade expedita.

## 4. Resultados

### 4.1. Bauxita amazônica (PA – Brasil)

A umidade média de cada embarque foi determinada a partir da ponderação das massas e umidades encontradas a cada incremento A, B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub>. Ou seja, usando como referência o embarque 1, os 50 resultados de umidade das amostras A<sub>1j</sub> geraram um resultado final de umidade A para tal embarque, enquanto os 50 resultados de umidade das amostras B<sub>1j1</sub> foram agrupados gerando um único resultado de B<sub>1</sub> e os 50 resultados de umidade das amostras B<sub>1j2</sub> geraram a umidade B<sub>2</sub> deste embarque. Ao final de cada embarque, tem-se um único valor de cada referência: umidades expedita, oficial, A, B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub>. Além disso, para calcular a umidade das amostras B compostas, os resultados de umidade de B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub> foram ponderados com as suas massas, para cada incremento dos embarques.

O mesmo raciocínio foi utilizado para determinação dos teores das amostras.

#### 4.1.1. Umidade: Estufa e Chapa Aquecida

A Tabela 2 resume os principais resultados de umidade ponderada obtidos dos ensaios de secagem em estufa e em chapa da bauxita amazônica.

Tabela 2 - Umidade de bauxita obtida por diferentes métodos de secagem.

# Embarque	Umidade (%)					
	Expedita (Chapa)	Oficial (Estufa)	A (Estufa)	B (Estufa)	B <sub>1</sub> (Estufa)	B <sub>2</sub> (Estufa)
1	11,99	12,96	13,22	13,43	13,49	13,43
2	12,80	13,12	13,42	13,41	13,48	13,41
3	13,17	13,33	13,88	13,69	13,67	13,69

Na Tabela 3 encontram-se os valores de média e desvio padrão dos incrementos das amostras A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> e B composta.

Tabela 3 - Estatísticas dos dados de umidade por incremento.

Amostra	Média (%)	Desvio Padrão (%)
A	13,49	0,94
B <sub>1</sub>	13,58	1,56
B <sub>2</sub>	13,49	0,92
B (composta)	13,50	0,92

As Figuras 8 e 9 apresentam os gráficos que indicam a correlação entre umidade expedita, secagem em chapa aquecida, e oficial, secagem em estufa, por embarque e por incremento, respectivamente.

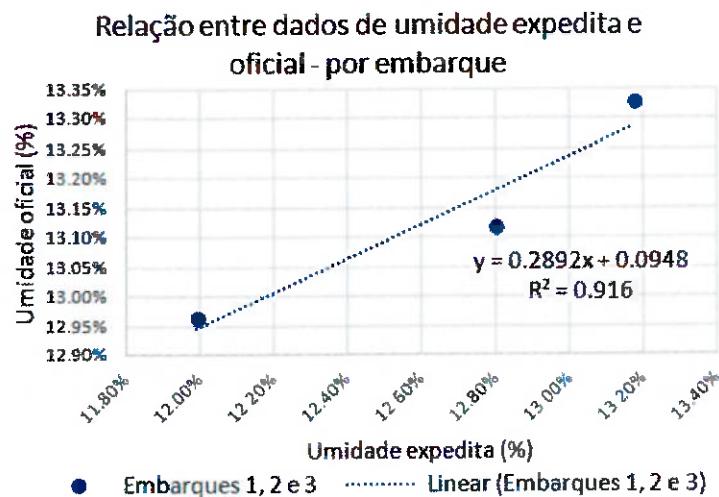


Figura 8 - Correlação umidade expedita e oficial por embarque.  
Fonte: autoria própria.

Observa-se que não é possível, estatisticamente, estabelecer uma relação entre os dados apresentados na Figura 8 devido ao pequeno número de embarques, que não fornece resultados confiáveis. Assim, foram analisados os dados por incremento. A Figura 9 relaciona os pares de 150 dados de cada um dos três embarques estudados. A partir das ferramentas estatísticas, observa-se que a umidade dos incrementos das amostras expedita e oficial apresentam baixíssima correlação, apesar de não apresentar viés, ou erro sistemático.

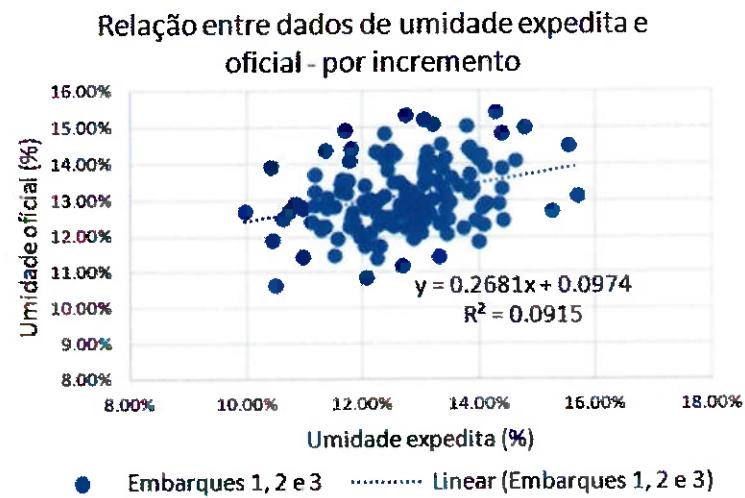


Figura 9 - Correlação umidade expedita e oficial por incremento.  
Fonte: autoria própria.

As Figuras 10 e 11 apresentam os gráficos que indicam a correção entre umidade das amostras B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub>, por embarque e por incremento, respectivamente. As amostras foram secas em estufa e provenientes de um mesmo corte do amostrador, diferindo quanto aos métodos de sub-amostragem e massas coletadas para secagem.

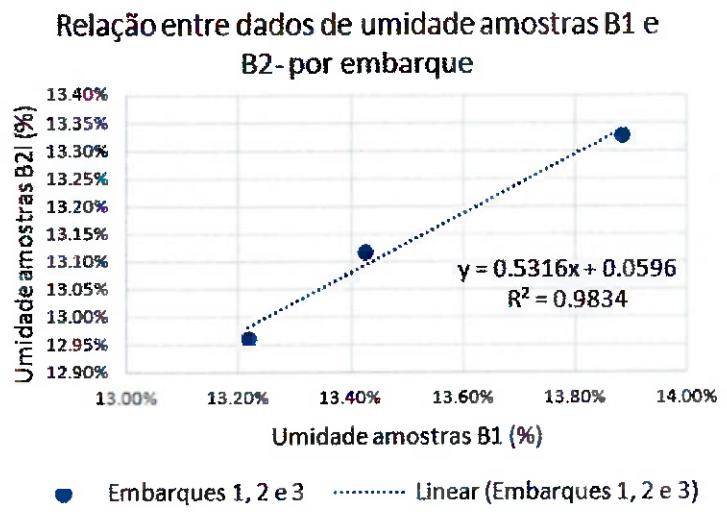


Figura 10 - Correlação umidade amostras B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub> por embarque.  
Fonte: autoria própria.

Os dados apresentados na Figura 11 mostram um ajuste baixo entre a umidade dos incrementos das amostras B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub>.

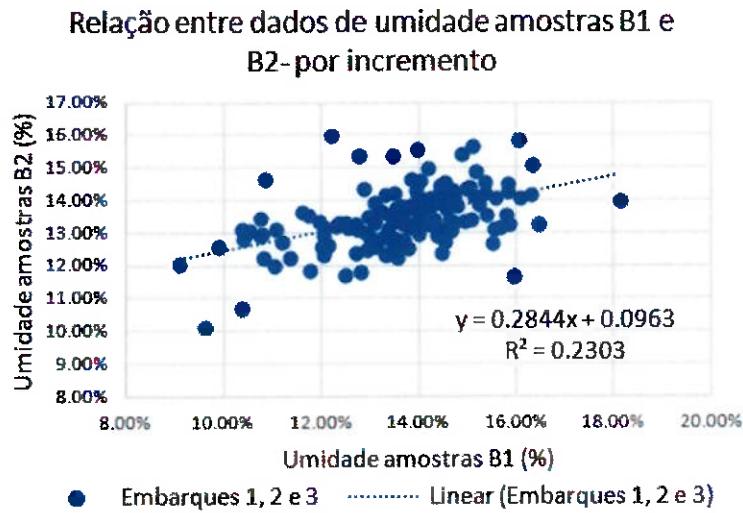


Figura 11 - Correlação umidade amostras B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub> por incremento.  
Fonte: autoria própria.

As Figuras 12 e 13 apresentam os gráficos que indicam a correção entre umidade das amostras B<sub>1</sub> e B composta, por embarque e por incremento,

respectivamente. Ambas secas em estufa e provenientes de um mesmo corte do amostrador, porém a partir de métodos de sub-amostragem e massas diferentes.

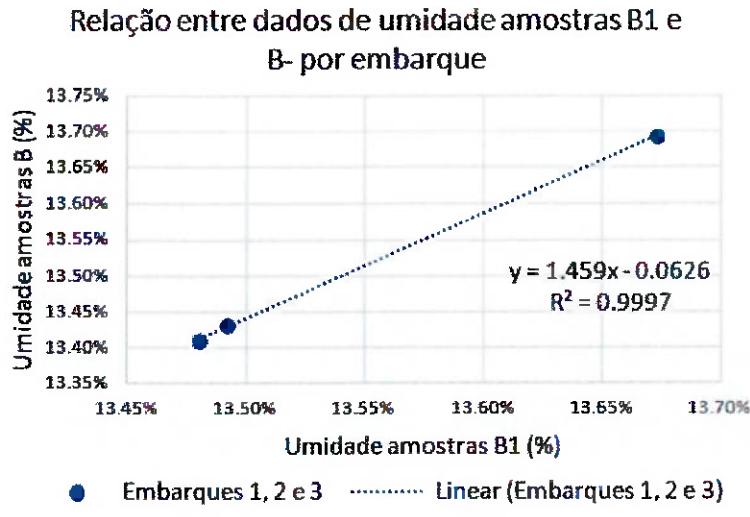


Figura 12 - Correlação umidade amostras B<sub>1</sub> e B composta por embarque.  
 Fonte: autoria própria.

Os dados apresentados na Figura 13 entre a umidade dos incrementos das amostras B<sub>1</sub> e B mostraram um ajuste melhor que a umidade dos incrementos das amostras B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub>.

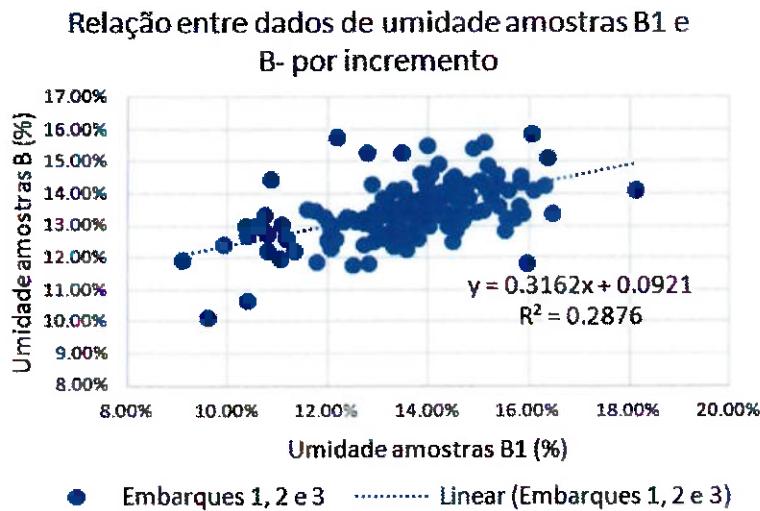


Figura 13 - Correlação umidade amostras B<sub>1</sub> e B composta por incremento.  
 Fonte: autoria própria.

#### 4.1.2. Análise Química

Após a determinação da umidade das amostras em estufa, os 30 primeiros incrementos do segundo embarque foram escolhidos para serem analisados

quimicamente. Assim, foi determinada a alumina aproveitável e a sílica reativa dos incrementos  $A_{2j}$ ,  $B_{2j1}$  e  $B_{2j2}$  (j de 1 a 30).

O método utilizado para determinação dos parâmetros químicos foi o *bomb digest* a 105°C.

A partir destes resultados, foi possível analisar a representatividade dos incrementos  $B_{kj2}$  em relação ao universo de amostras B compostas.

A Tabela 4 resume os principais resultados de teores ponderados de alumina aproveitável (av.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e sílica reativa (re.SiO<sub>2</sub>), a partir da análise química.

Tabela 4 -Teores dos diferentes incrementos de bauxita do embarque 2.

Parâmetro Análise Química	Teores das amostras do embarque 2			
	A	B (composta)	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>
Av.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	46,76	46,78	47,08	46,77
Re.SiO <sub>2</sub> (%)	4,19	4,23	4,43	4,22

Na Tabela 5 estão os valores de média e desvio padrão para cada um dos parâmetros de composição avaliados. A diferença média dos incrementos B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub>, para av.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e re.SiO<sub>2</sub> são, respectivamente, 0,28 e 0,23.

Tabela 5 - Média e desvio padrão dos dados por incremento de análise química.

Amostra	Média (%)		Desvio Padrão (%)	
	Av.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Re.SiO <sub>2</sub>	Av.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Re.SiO <sub>2</sub>
A	46,74	4,18	1,41	0,24
B <sub>1</sub>	47,04	4,44	2,57	0,59
B <sub>2</sub>	46,76	4,21	1,53	0,32
B (composta)	46,78	4,22	1,52	0,32

Nas Figuras 14 e 15 encontram-se as curvas de comparação de teores encontrados das amostras B<sub>2</sub> e B composta. Observa-se que os incrementos de B<sub>2</sub>, apresentados de cor verde nos gráficos, representam com bastante fidelidade os teores dos incrementos de B composta, ilustrados pela curva preta. Assim, é possível concluir que os incrementos B<sub>2</sub> representam em termos de umidade, de teor e de granulometria os incrementos B.

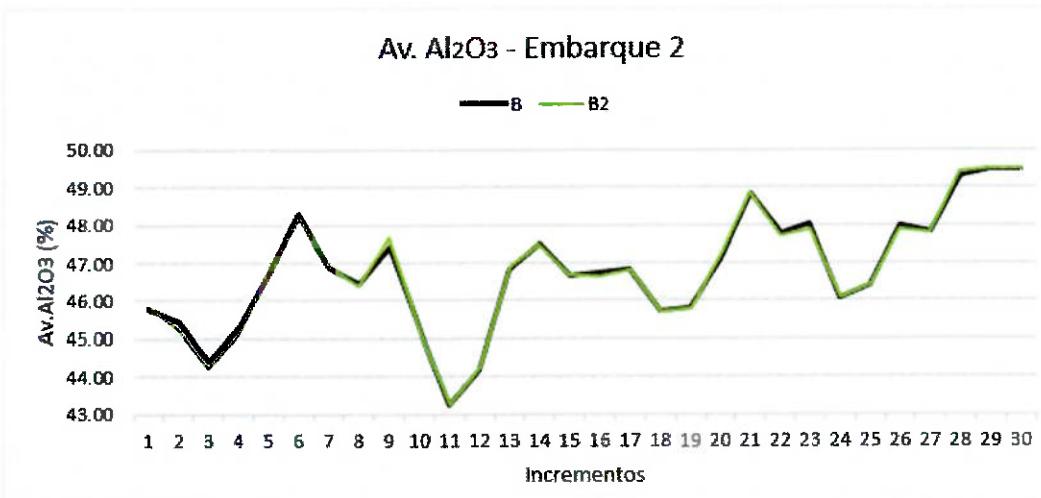


Figura 14 - Gráfico teor av. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> embarque 2.  
Fonte: autoria própria.

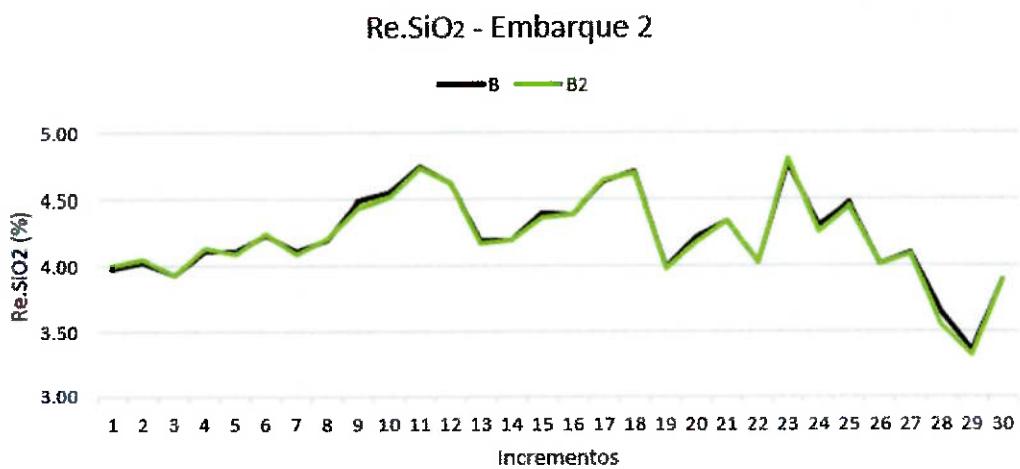


Figura 15 - Gráfico teor re. SiO<sub>2</sub> embarque 2.  
Fonte: autoria própria.

## 4.2. Bauxita australiana

### 4.2.1. Umidade: Estufa e equipamento infravermelho

A Tabela 6 resume os principais resultados de umidade ponderada obtidos dos ensaios de secagem em equipamento infravermelho. É possível observar que os resultados expedidos por infravermelho na Austrália não apresentam tendência de subestimar valores de secagem obtidos pela estufa. Tal observação é relevante para a segurança do transporte das cargas, auxiliando o controle do TML da bauxita embarcada.

Os embarques destacados com asterisco (\*) tiveram amostras com massa de aproximadamente 50 g, enquanto as demais pesaram 25 g para a secagem em infravermelho.

Tabela 6 - Umidade de bauxita obtida por secagem em infravermelho.

# Embarque	Umidade Oficial - Estufa (%)	Umidade Eq. Infravermelho (%)
1	9.25	8.91
2*	8.42	8.30
3*	7.91	7.72
4*	7.55	7.50
5	7.74	7.69
6	7.61	7.45
7	7.98	7.83
8	8.23	7.92
9	8.07	7.99
10	7.43	7.78
11	7.37	7.47
12	7.35	7.59
13	7.37	7.77
14	7.83	7.88
15	7.60	7.86

Na Tabela 7 estão os dados estatísticos dos incrementos dos 15 embarques.

Tabela 7 - Média e desvio padrão dos dados de umidade por incremento da Austrália

Parâmetro	Média (%)	Desvio Padrão (%)
Umidade Oficial	7,86	0,77
Umidade Expedita	7,97	1,05
Diferença Absoluta	-0,11	0,75
Diferença Relativa	-1,40	9,54

As Figuras 16 e 17 apresentam os gráficos que indicam a correlação entre umidade expedita, secagem em equipamento infravermelho, e oficial, secagem em estufa, por embarque e por incremento, respectivamente.

Relação entre secagem em  
infravermelho e estufa - por embarque

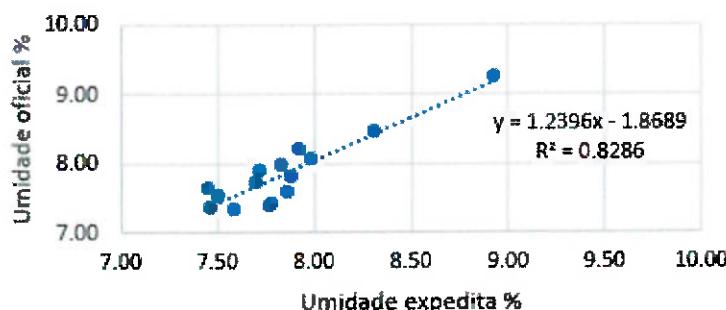


Figura 16 – Correlação entre umidade oficial (estufa) e expedita (infravermelho) por embarque.  
Fonte: autoria própria.

A Figura 17 relaciona os pares de 90 dados de cada um dos quinze embarques estudados. A partir das ferramentas estatísticas, observa-se que a umidade dos incrementos das amostras expedita e oficial apresentam um ajuste melhor quando comparado às correlações apresentadas nos itens anteriores sobre a bauxita amazônica.

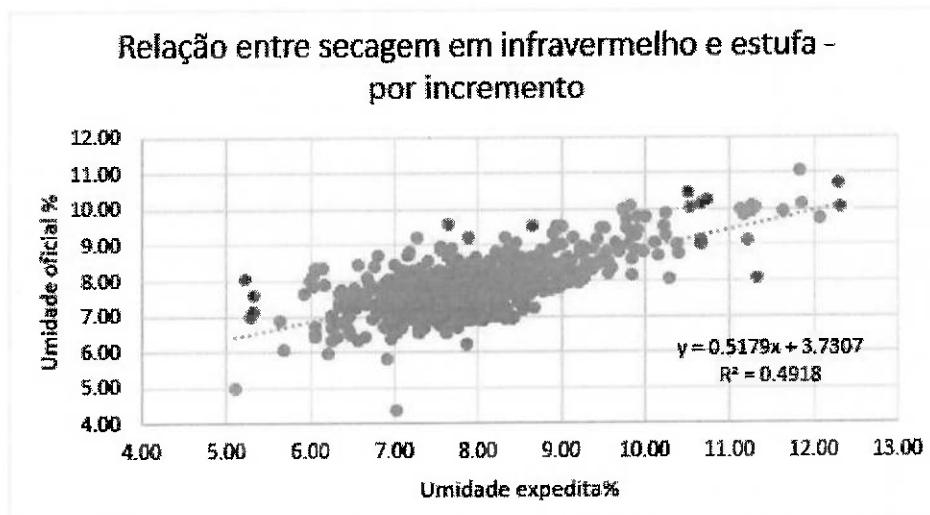


Figura 17 - Correlação entre umidade oficial (estufa) e expedita (infravermelho) por incremento.  
Fonte: autoria própria.

Usando a equação da reta determinada na Figura 17, é possível estimar a umidade oficial do embarque. Tais resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 -Umidade de bauxita australiana prevista a partir dos dados de secagem em infravermelho.

# Embarque	Umidade Oficial - Estufa (%)	Previsão de umidade (%)	Diferença absoluta (Previsão - Oficial)
1	9.25	8.35	-0.90
2*	8.42	8.03	-0.43
3*	7.91	7.73	-0.18
4*	7.55	7.61	0.06
5	7.74	7.71	-0.03
6	7.61	7.59	-0.07
7	7.98	7.79	-0.20
8	8.23	7.83	-0.40
9	8.07	7.86	-0.20
10	7.43	7.76	0.33
11	7.37	7.60	0.22
12	7.35	7.66	0.31
13	7.37	7.75	0.36
14	7.83	7.81	-0.02
15	7.60	7.80	0.20

## **5. Conclusões**

Este estudo sugere a adoção de um método alternativo de coleta da amostra para a secagem expedita além da utilização de equipamentos de secagem online infravermelho para determinação da umidade expedita.

Não se obtiveram correlações adequadas para que se pudesse recomendar o uso da umidade expedita como método fiel de estimativa da umidade oficial, apesar de os resultados entre umidade expedita e oficial não terem apresentado erro sistemático.

### **5.1. Bauxita amazônica (PA – Brasil)**

Observa-se que as umidades das amostras A e oficial, de um mesmo embarque, apresentam valores diferentes apesar de cada um de seus incrementos apresentarem a mesma massa e terem sido secos durante o mesmo tempo e equipamento, i.e., a estufa. A hipótese levantada para explicar tal discrepância é a obtenção dos incrementos a partir de cortes diferentes pelo amostrador automático na torre de amostragem. Assim, uma possível maneira de reduzir a diferença entre a umidade prevista da bauxita e a embarcada, seja coletar a amostra para a determinação da umidade expedita e oficial a partir de um único corte, como foi feito na amostragem de B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub> ou na amostragem de B<sub>1</sub> e B composta, para a obtenção dos valores expedito e oficial, respectivamente.

### **5.2. Bauxita australiana**

A secagem em equipamento infravermelho para a determinação da umidade expedita indica resultados mais precisos da umidade oficial, apesar de a correlação não ter sido suficiente para definir uma equação precisa para a estimativa da umidade oficial. Segundo os dados apresentados na Tabela 6, a média da diferença absoluta entre a previsão da umidade oficial e o seu valor efetivo determinado pela secagem em estufa é 0,06 e o desvio padrão entre os dados é de 0,34.

Estudos adicionais devem ser realizados para determinar com mais precisão e acurácia a correlação entre os resultados de umidade oficial e expedita, seja a partir do uso de chapa aquecida, equipamento infravermelho ou de micro-ondas. Entretanto, este estudo indica que não há viés entre os métodos de secagem de estufa e infravermelho e que as médias dos incrementos amostrais podem ser usados como estimativa da umidade do minério carregado nos navios.

## 6. Referências

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL). O Atual Contexto da CFEM para a Competitividade da Indústria Mineral.** 1 mar. 2016. 30 slides.

**AMSA, 2018. Australian Government – Australian Maritime Safety Authority.** Disponível em: <https://www.amsa.gov.au/vessels-operators/cargoes-and-dangerous-goods/dynamic-separation-cargoes>. Acesso em: setembro, 2018.

**DIAS, L.G. Estudo do Processo de Secagem em Estufa e por Micro-ondas de Compósitos Cerâmicos de Argila e Resíduos de Esteatito.** São João Del Rei: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del Rei, 2013, 111p. (Dissertação de Mestrado)

**DNPM, 2017. Anuário Mineral Brasileiro – Principais Substâncias Metálicas.** Ano base 2016. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro>. Acesso em: agosto, 2018.

**DNPM, 2016. Sumário Mineral: Alumínio.** Ano base 2015. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/dnpm/sumarios/aluminio-sumario-mineral-2016>. Acesso em: agosto, 2018.

**ENGSTRÖM, K.; MICKELSSON, K-O.; TÖYRÄ, S.; ESBENSEN, K.H. Improvement of Sampling for Moisture Content Analysis in Iron Ore Pellet Feed – Variographic Characterization and On-line IR-analysis.** Paper-152, XXIX International Mineral Processing Council (IMPC) 2018.

**FERREIRA, R.F.; POLICARPO, D.L.V.; PADULA, V.P.; FERREIRA, M.T.S. Limite de Umidade Transportável de Minérios de Ferro: Aspectos Regulatórios e Técnicos.** *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 16 – 23, jan./mar. 2017.

**INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira.** 7<sup>a</sup> Ed. dez/2012.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **IMSBC Code - International Maritime Solid Bulk Cargoes Code.** (IMSBC) Annex 3 Resolution MSC.268(85), 2008.

LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, C.A. **Tratamento de Minérios.** CETEM/MCT, 2010. Cap. 2 Amostragem, p. 21 – 53.

MAGALHÃES, R.S. **Avaliação de diferentes processos de secagem de bauxita para controle de qualidade.** Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Mians, Escola de Minas, UFOP, 2002, 74p. (Dissertação de Mestrado)

MAGALHÃES, R.S.; LIMA, R.M.F.; SOUZA, H.A. **O uso de microondas para determinação de umidade de bauxita.** Rev. Esc. Minas (online), Vol.56, n.4, p. 255-259, 2003.

METAXAS, C., MEREDITH, R.J. **Industrial microwave heating.** London: Peter Peregrinus, 1983, 357p.

METTLER-TOLEDO IND. E COM. LTDA. **Guia para Análise de Umidade: Determinação de Umidade com o Analisador de Umidade de Halogênio.** P. 5-6, 2013.

SAMPAIO, J.A.; ANDRADE, M.C.; DUTRA, A.J.B. **Rochas e Minerais Industriais.** CETEM, 2005. Cap. 13 Bauxita, p. 279 – 303.