

**Universidade de São Paulo  
Instituto de Geociências**

**Associação da heterogeneidade intrínseca de diferentes tipos de minério com a  
variabilidade natural.**

**Trabalho de Formatura**

**Projeto (TF- 19/26)**

**Aluna: Narubia Gonçalves**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Carolina Chierigati**

**São Paulo- SP  
2019**

**Universidade de São Paulo  
Instituto de Geociências**

**Associação da heterogeneidade intrínseca de diferentes tipos de minério com a  
variabilidade natural.**

**Trabalho de Formatura**

**Projeto (TF- 19/26)**

**Aluna: Narubia Gonçalves**

**De acordo**



**Profª. Drª. Ana Carolina Chieregati**

**(Orientadora)**

**São Paulo- SP  
2019**

**À minha avó Adriana (*in memoriam*)**

## **AGRADECIMENTOS**

À Prof<sup>a</sup>. Ana Carolina Chieregati, minha orientadora, pela paciência, confiança, consideração e todo carinho.

À Eliana Mano e ao Prof. Marcelo, meus relatores, pelas valiosas contribuições à monografia.

Aqueles que contribuíram diretamente para este trabalho: Gabriela, pela grande ajuda durante os testes; a equipe do LTM, por toda ajuda; Bassan, pelas discussões geológicas; Erílio, por me ajudar na preparação de uma das malhas; e Fernando, pelas indicações bibliográficas.

Ao Prof. Archanjo, que me apresentou a geologia e me apoiou na decisão de mudar de curso.

Aos Professores Gergely, Eliana e Fábio, por me aceitarem no processo de transferência interna.

À Alice Westin por não me deixar trancar o curso, e aos professores Mário Campos e Lucelene, por reanimarem o meu coração geológico.

Aos professores Boggiani, Lena e Caetano, por trazerem em suas aulas discussões críticas a respeito da profissão geólogo.

À minha família de sangue, por todo amor e apoio, e à família de amigos, aqueles que me acompanham desde antes do vestibular e aqueles que a USP me deu. Vocês são essenciais na minha vida.

## RESUMO

Em todo empreendimento mineiro o minério é submetido a procedimentos de amostragem em diversas etapas do processo, que visam obter uma estimativa do teor do elemento de interesse. Estes procedimentos se dão conforme um protocolo de amostragem específico e são de extrema importância, pois determinam a qualidade da matéria prima destinada à indústria de transformação. Para a otimização dos protocolos de amostragem e a determinação de massas mínimas de amostras representativas, são realizados testes de heterogeneidade para estimar a heterogeneidade intrínseca do minério e calibrar as constantes de amostragem  $K$  e  $\alpha$ , definidas pela Teoria de Amostragem (TOS ou *Theory of Sampling*) de Pierre Gy.

A proposta deste trabalho foi relacionar a heterogeneidade intrínseca (parâmetros de amostragem  $K$  e  $\alpha$  da fórmula de Gy) de dois diferentes tipos de minério (bauxita e zinco) com a variabilidade natural destes minérios. A justificativa para este estudo foi entender esta relação visando facilitar a estimativa de massas mínimas de amostras e de protocolos ótimos de amostragem. O entendimento desta relação permitiria que outras operações do mesmo tipo de minério pudessem usar os parâmetros de amostragem determinados neste estudo para um cálculo aproximado de massas mínimas de amostras e de protocolos ótimos de amostragem para o seu minério sem a necessidade de realização de testes de heterogeneidade, extremamente morosos e custosos.

Este estudo compreendeu a realização dos testes de heterogeneidade e análise da mineralogia de bauxita do oeste do Pará, e de zinco do noroeste de Minas Gerais. Foram selecionados para os testes aproximadamente 500 kg de cada tipo de minério, as amostras foram britadas e peneiradas nas malhas de interesse. Em seguida, foi realizado o quarteramento das amostras e então a realização dos testes de heterogeneidade, a partir do qual se estimou a heterogeneidade intrínseca dos minérios, além dos valores calibrados para os parâmetros de amostragem  $K$  e  $\alpha$  da fórmula de Gy.

A análise da mineralogia se deu por análise microscópica dos grãos das frações granulométricas, de modo que foi possível obter uma indicação da heterogeneidade de constituição dos minérios, além de verificar a ocorrência dos minerais de minério por fração granulométrica.

A análise conjunta dos dados permitiu associar a variabilidade natural do minério com a heterogeneidade intrínseca definida pela Teoria da Amostragem de Pierre Gy. O minério de alumínio (bauxita) apresentou baixa variabilidade natural e baixa heterogeneidade intrínseca, enquanto o minério de zinco apresentou média variabilidade natural e de média a alta heterogeneidade intrínseca.

## ABSTRACT

In every mining operation, the ore is subjected to sampling procedures at various stages of the process, which aim to obtain an estimate of the content of the element of interest. These procedures follow a specific sampling protocol and are of utmost importance as they determine the quality of the raw material for the processing industry. Aiming at the optimization of sampling protocols and determination of minimum representative sample masses, heterogeneity tests are performed to estimate the ore intrinsic heterogeneity and to calibrate the sampling constants,  $K$  and  $\alpha$ , defined by Pierre Gy's Theory of Sampling (TOS).

The purpose of this work was to relate the intrinsic heterogeneity ( $K$  and  $\alpha$  of Gy's formula) of two different types of ore (bauxite and zinc) with the natural variability of the ore. The justification for this study was to understand this relationship in order to facilitate the estimation of minimum sample masses and optimal sampling protocols. Understanding this relationship would allow other operations of the same ore type to use the sampling parameters determined in this study for an approximate calculation of their minimum sample masses and optimal sampling protocols without the need of performing heterogeneity tests, which are extremely time consuming and costly.

This study consists of the performance of heterogeneity tests and mineralogy analysis of an aluminum ore from western Pará and a zinc ore from northwestern Minas Gerais. Approximately 500 kg of each ore type were selected for the tests, then the samples were crushed and sieved in the size fractions of interest. Subsequently, the samples were divided and the heterogeneity tests were performed, from which the ore intrinsic heterogeneities were estimated, as well as the calibrated values for  $K$  and  $\alpha$  sampling parameters of Gy's formula.

Mineralogy was analyzed by microscopic analysis of the grains of the granulometric fractions, so that it was possible to obtain an indication of the ore constitution heterogeneity, besides verifying the occurrence of ore minerals by granulometric fraction.

The joint analysis of the data allowed to associate the natural variability of the ore with the intrinsic heterogeneity defined by Pierre Gy's Sampling Theory. Aluminum ore (bauxite) showed low natural variability and low intrinsic heterogeneity, while zinc ore showed medium natural variability and medium to high intrinsic heterogeneity.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. METAS E OBJETIVOS .....	2
3. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO .....	2
3.1. Variabilidade natural dos minérios .....	2
3.2. Modelos genéticos dos depósitos .....	3
3.2.1. Depósito de bauxita .....	3
3.2.2. Depósito de zinco .....	5
3.3. Amostragem .....	7
3.3.1. Erro fundamental de amostragem (FSE) .....	9
3.3.2. Teste de Heterogeneidade .....	10
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	13
4.1. Coleta das amostras.....	13
4.2. Britagem e peneiramento.....	13
4.3. Divisão e teste de heterogeneidade.....	14
4.4. Análises químicas.....	17
4.5. Análise por microscopia óptica .....	18
5. RESULTADOS OBTIDOS .....	19
5.1. Heterogeneidade de constituição.....	19
5.1.1. Minério de Alumínio (Bauxita).....	20
5.1.2. Minério de Zinco .....	26
5.2. Teste de heterogeneidade .....	32
5.2.1. Malhas, Massas e Teores.....	32
5.2.2. Fórmula de Gy (não calibrada) .....	34
5.2.3. Fórmula de Gy (calibrada) .....	35
6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	38
6.1. Heterogeneidade de constituição.....	38
6.1.1. Bauxita .....	39
6.1.2. Zinco .....	39

6.2. Teste de Heterogeneidade .....	40
7. CONCLUSÕES.....	45
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

## ANEXOS

ANEXO 1 – DADOS EXPERIMENTAIS DA ALUMINA

ANEXO 2 – DADOS EXPERIMENTAIS DA SÍLICA REATIVA

ANEXO 3 – DADOS EXPERIMENTAIS DO ZINCO

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Conceito ilustrativo de representatividade. 1º alvo: acurácia (proximidade entre os valores obtidos pela repetição do processo de seleção); 2º alvo: precisão (proximidade da medida relativamente ao valor verdadeiro); 3º alvo: representatividade (Chieragati e Pitard, 2018). .....	8
Figura 2 - Fluxograma da relação de dependência dos assuntos abordados neste trabalho. Para um protocolo de amostragem apropriado é necessário obter-se um FSE mínimo, este é determinado pela heterogeneidade de constituição, e minimizado pela calibração da fórmula de Gy (Elaborado pela autora).....	12
Figura 3 – Etapas de britagem das amostras abaixo de 1” (25,4 mm) em um britador de mandíbula (3a); e de peneiramento a seco em peneiras vibratórias quadradas (3b). (Fonte: própria) .....	14
Figura 4 - Etapa de divisão da amostra, por pilha longitudinal lote L1 (4a); e utilizando o divisor tipo Jones (demais lotes) (4b), detalhe das calhas do divisor (4c) (Fonte: própria)...	15
Figura 5 – Malhas dos lotes da bauxita: L1 com 50 células (A); L2 com 90 células (B); L3 com 360 células (C) e L4 com 540 células (D) (Fonte: própria). .....	16
Figura 6 - Malha adotada para o lote L4 com 280 células, para o minério de zinco (Fonte: própria). .....	16
Figura 7 – Coleta de um fragmento de cada uma das 50 células da malha do lote L1 (A); pesagem de uma amostra do lote L4 (composta por 540 fragmentos) (B); amostras dos quatro lotes da bauxita, devidamente pesadas e identificadas (Fonte: própria). .....	17
Figura 8 - Fluxograma dos processos envolvidos nos materiais e métodos realizados neste estudo (Elaborado pela autora).....	18



Figura 9 - Amostra de mão de bauxita do lote L1. Fragmentos subesféricos, alongados, de coloração predominantemente marrom avermelhada, com regiões mais claras tendendo ao bege róseo (A); detalhe de um fragmento com manchas amareladas (B) (Fonte: própria).	20
Figura 10 – Imagem em lâmina de um grão do lote L1 da bauxita. Observa-se matriz gibbsítica microcristalina impregnada de uma alteração de textura fina de coloração amarronzada, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).	21
Figura 11 - Imagem em lâmina de um grão do lote L1 da bauxita. Gibbsita mesocristalina com geminação polissintética e goethita subedral, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).	21
Figura 12 – Imagem em lâmina de um grão do lote L1 da bauxita. Preenchimento de poro por mineral opaco com inclusões de gibbsita mesocristalina, e goethita, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).	21
Figura 13 – Amostra de mão de bauxita do lote L2. Fragmentos predominantemente angulosos, alongados, de coloração marrom avermelhada, com regiões mais claras tendendo ao bege róseo (A); detalhe de um fragmento poroso com alterações de cor amarelada (B) (Fonte: própria).	22
Figura 14 - Imagem em lâmina de um grão do lote L2 da bauxita. Observa-se gibbsita mesocristalina preenchendo fissuras com formas encurvadas, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).	22
Figura 15 - Imagem em lâmina de um grão do lote L2 da bauxita. Observa-se goethita com hábito anedral e gibbsita mesocristalina, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).	23
Figura 16 - Amostra de mão de bauxita do lote L3. Fragmentos angulosos com alteração amarelada a esbranquiçada (A); Fragmento com inclusões pretas avermelhadas (B)(Fonte: própria).	23
Figura 17 - Imagem em lâmina de um grão do lote L3 da bauxita. Observa-se matriz gibbsítica muito fina com poros e fissuras preenchidas principalmente por massas de alteração marrom clara, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).	24
Figura 18 – Imagem em lâmina de um grão do lote L3 da bauxita. Observam-se preenchimentos de alteração de coloração marrom com inclusões de gibbsita mesocristalina, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).	24
Figura 19 - Amostra de mão de bauxita do lote L4. Observam-se alguns fragmentos angulosos e outros sub-arredondados, com inclusões vermelhas (A) e esbranquiçadas (B) (Fonte: própria).	25

Figura 20 - Imagem em lâmina de um grão do lote L4 da bauxita. Observa-se matriz alterada, de aspecto terroso, com pouca presença de poros e fissuras, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria). .....	25
Figura 21 - Imagem em lâmina de um grão do lote L4 da bauxita. Observam-se poros preenchidos por gibbsita mesocristalina na matriz alterada de aspecto terroso, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC)(B) (Fonte: própria). .....	25
Figura 22 - Amostra de mão de minério de zinco do lote L1. Fragmentos angulosos, com coloração predominantemente rosa acastanhado e menos frequente cinza esverdeado (A); detalhe do bandamento observado em alguns fragmentos (B) (Fonte: própria). .....	27
Figura 23 – Imagem em lâmina de um grão do lote L1 do minério de zinco. Observa-se dolomita e willemita com textura granoblástica em bandas irregulares, cortadas por veios de textura microgranular, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria). .....	27
Figura 24 - Imagem em lâmina de um grão do lote L1 do minério de zinco. Observa-se dolomita envolvida por opacos (à esquerda), veio microgranular com dolomita e willemita associadas (à direita), sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria) .....	27
Figura 25 - Amostra de mão de minério de zinco do lote L2. Fragmentos angulosos, com coloração predominantemente rosa acastanhado e menos frequente cinza esverdeado (A); detalhe de um fragmento de cor castanho com venulações de cor mais clara, e veio de cor cinza escuro (B) (Fonte: própria) .....	28
Figura 26 - Imagem em lâmina de um grão do lote L2 do minério de zinco. Observa-se matriz micrítica com inclusões irregulares de opacos, com willemita de textura fibro-radiada, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).....	29
Figura 27 - Imagem em lâmina de um grão do lote L2 do minério de zinco. Observa-se willemita com textura fibro-radiada, com substituições em seus limites de willemita com textura granoblástica, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria). .....	29
Figura 28 - Amostra de mão de minério de zinco do lote L3. Observam-se fragmentos angulosos com venulações deformadas (A); fragmentos de aspecto maciço de diferentes cores (B) (Fonte: própria).....	30
Figura 29 - Imagem em lâmina de um grão do lote L3 do minério de zinco. Observa-se matriz essencialmente dolomítica (micrítica), com presença secundária de opacos, com cristais sobrecrecidos prismáticos de willemita, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).....	30

Figura 30 - Imagem em lâmina de um grão do lote L3 do minério de zinco. Observa-se willemita prismática deformada sobre dolomita anedral, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria). .....	30
Figura 31 - Amostra de mão de minério de zinco do lote L4. Observam-se fragmentos angulosos, de diferentes cores e com venulações deformadas (Fonte: própria). .....	31
Figura 32 – Imagem em lâmina de um grão do lote L4 do minério de zinco. Observa-se no canto superior esquerdo willemita em contatos poligonizados e veio com textura micrítica, à direita observa-se willemita com hábito subedral, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria). .....	31
Figura 33 - Correlação entre $IH_L$ e o diâmetro do fragmento – alumina aproveitável (Elaborada pela autora). .....	37
Figura 34 - Correlação entre $IH_L$ e o diâmetro do fragmento – sílica reativa (Elaborada pela autora). .....	37
Figura 35 - Correlação entre $IH_L$ e o diâmetro do fragmento – zinco (Elaborada pela autora). .....	38
Figura 36 - Teor médio de Alumina obtido nos lotes (Elaborada pela autora). .....	41
Figura 37 - Teor médio de Sílica obtido nos lotes (Elaborada pela autora). .....	41
Figura 38 - Teor médio de Zinco obtido nos lotes (Elaborada pela autora). .....	41
Figura 39 - Relação dos teores médios com os coeficientes de variação obtidos para os lotes dos minérios de alumínio e zinco (Elaborada pela autora). .....	42
Figura 40 - Relação dos teores médios e as constantes K e Alpha obtidas pelo teste de heterogeneidade, foram utilizados os menores teores médios entre os quatro lotes, 6,14% para o Zn, e 53,20% para $Al_2O_3$ . (Elaborada pela autora).....	42
Figura 41 - Diferença entre os valores obtidos para as constantes da fórmula calibrada de Gy e as constantes da fórmula não calibrada, para alumina, sílica e zinco (Elaborada pela autora). .....	43

## ÍNDICE DE TABELA

Tabela 1 - Frações granulométricas do peneiramento das amostras dos minérios de alumínio e zinco (Elaborada pela autora). .....	14
Tabela 2 - Dados de tamanho e quantidade de células das malhas adotadas para os quatro lotes de bauxita e zinco (Elaborada pela autora). .....	15
Tabela 3 - Quantidade de grãos das lâminas dos minérios de alumínio e zinco (Elaborada pela autora). .....	19
Tabela 4 - Comparação dos dados de malhas e massas obtidas nos testes de heterogeneidade para a bauxita e minério de zinco (Elaborada pela autora). .....	32

Tabela 5 - Comparação dos teores obtidos nos testes de heterogeneidade para a bauxita e minério de zinco (Elaborada pela autora).....	33
Tabela 6 - Parâmetros utilizados para o cálculo de c (Elaborada pela autora).....	34
Tabela 7 - Valores obtidos do fator de heterogeneidade constitucional (IHL) por lote dos minérios de alumínio e zinco (Elaborada pela autora).....	36
Tabela 8 - Valores obtidos de dn por lote (Elaborada pela autora).....	36
Tabela 9 – Resumo dos dados discutidos para a bauxita e o minério de zinco (Elaborada pela autora). ....	44

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de formação de um depósito mineral atribui a ele uma variabilidade natural, ou seja, ele não é homogêneo e o teor de minério não se distribui de forma idêntica ao longo de todo o depósito, além disto, não se pode conhecer exatamente esta distribuição, pois é inviável e sem sentido realizar a análise química de todo o depósito.

É através da amostragem que é feita a estimativa do teor e da quantidade de minério, e é com base nessa estimativa que são realizados a avaliação econômica, o planejamento de lavra, o tempo de vida útil e os cálculos financeiros de previsão de desempenho da mina. Para que se evitem erros, desvios excessivos e vieses na estimativa do teor, devem-se desenvolver protocolos e procedimentos de amostragem acurados e precisos.

Além do teor de minério, também são estimados o teor e a quantidade de contaminantes do minério, informação de extrema importância, pois há penalidades se o teor e a quantidade de contaminantes excederem o limite preestabelecido, portanto, o processo de amostragem é de fundamental importância para o sucesso de um empreendimento mineiro.

A amostragem abordada neste trabalho é aquela realizada na alimentação de usinas de beneficiamento do minério e de torres de amostragem. O minério bruto extraído da frente de lavra é transportado até a usina de beneficiamento, na qual passa por uma série de processos que visam obter um concentrado do mineral de interesse, ou seja, entre o minério bruto e o concentrado final há diversas etapas de amostragem que determinam a qualidade da matéria prima destinada à indústria de transformação.

Visando obter o desvio padrão mínimo, chamado de desvio padrão do erro fundamental de amostragem (FSE – *Fundamental Sampling Error*), são realizados testes de heterogeneidade, desenvolvidos para estimar a heterogeneidade intrínseca do minério e calibrar as constantes de amostragem  $K$  e  $\alpha$ , definidas pela Teoria da Amostragem (*TOS ou Theory of Sampling*) de Pierre Gy. A calibração dessas constantes é essencial para a otimização de protocolos de amostragem e o cálculo de massas mínimas de amostras representativas.

A proposta deste trabalho é relacionar a heterogeneidade intrínseca (parâmetros de amostragem  $K$  e  $\alpha$ ) de diferentes tipos de minério com a variabilidade natural dos minérios de alumínio (baixa variabilidade) e zinco (média variabilidade). Entender esta relação auxilia no desenvolvimento de um protocolo de amostragem preciso e acurado, além de servir como uma primeira indicação da heterogeneidade intrínseca para outras operações de minérios de baixa e média variabilidade natural, contribuindo, assim, para a otimização de seus respectivos protocolos de amostragem sem a necessidade de realização de testes de heterogeneidade.

Uma produção mineral eficiente e sustentável depende da otimização dos processos e da integração das áreas de conhecimento envolvidas na mineração. Produzir desta forma é

uma necessidade, visto que é notório o crescimento contínuo da demanda mundial por recursos minerais, enquanto as descobertas de depósitos com altos teores de minério têm se tornado cada vez mais escassas.

## **2. METAS E OBJETIVOS**

Este projeto tem como objetivo associar a variabilidade natural dos minérios de alumínio (baixa variabilidade) e zinco (média variabilidade) com a heterogeneidade intrínseca destes minérios.

O projeto tem como meta estimar a heterogeneidade intrínseca do minério, definida pela Teoria da Amostragem de Pierre Gy, através da calibração dos parâmetros de amostragem  $K$  e  $\alpha$ , obtidas pela realização dos testes de heterogeneidade, bem como verificar, por meio de análise microscópica dos grãos, se há mudança na ocorrência dos minerais de minério e dos minerais de ganga por faixa granulométrica dos testes de heterogeneidade.

## **3. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO**

Para a melhor compreensão deste trabalho, a revisão bibliográfica foi dividida em variabilidade natural dos minérios, descrição dos modelos genéticos dos depósitos estudados, amostragem e teste de heterogeneidade.

### **3.1. Variabilidade natural dos minérios**

Segundo Grossi Sad (1986), a variabilidade natural de um minério é condicionada por sua gênese, esta determina o tipo de depósito, a quantidade, o teor, o estado químico e a forma do corpo de minério. A variabilidade natural se expressa na variabilidade de forma, de espessura, de teor, de composição mineralógica, entre outros atributos.

Para discutir a variabilidade é necessário conceituar o que se entende por homogeneidade. Na natureza não existe homogeneidade em sua verdadeira definição, porém um corpo geológico pode ser considerado homogêneo em relação a certo aspecto. A sua homogeneidade pode ser estabelecida através da estatística, comparando unidades de volume (ou componentes) em relação à heterogeneidade, o que implica que o conceito também depende da escala de observação (Grossi Sad, 1986).

A escala na qual o corpo pode ser descrito como homogêneo é o domínio do levantamento ou atributo investigado, este pode se comportar de modo sistemático (arranjado segundo um sistema) ou assistemático, e pode ser direcional ou não direcional. O corpo geológico será estatisticamente homogêneo quando a média da configuração de qualquer componente for a mesma para todos os outros componentes de igual tamanho tomados do corpo (Grossi Sad, 1986). Um corpo homogêneo em certo aspecto (por exemplo, corpo de estrutura maciça), pode ser heterogêneo em outro aspecto (por exemplo, composição química).

A variabilidade natural pode ser estimada pelo coeficiente de variação (CV) (Koch e Link, 1970; Grossi Sad, 1986), este é adimensional e utilizado para comparar a dispersão relativa de valores em torno da média:

$$CV = \frac{S}{\bar{x}}$$

Onde  $\bar{x}$  é a média da variável de interesse no depósito e S é o desvio padrão. Dessa forma, quanto menor o CV, menor é a variabilidade natural do minério.

Segundo Koch e Link (1970), o valor do coeficiente de variação depende fundamentalmente da variabilidade geológica, desde que a variabilidade introduzida pelo processo de amostragem seja bem controlada. Ainda para este autor, existe uma relação de dependência dos teores médios dos depósitos com os coeficientes de variação; à medida que o teor médio aumenta, o coeficiente de variação tende a diminuir. Coeficientes de variação extremamente altos, acima de 2,0 ou 2,5, são encontrados apenas para elementos presentes em proporções mínimas, como terras raras ou metais preciosos.

### **3.2. Modelos genéticos dos depósitos**

Os dois minérios estudados foram disponibilizados por duas minas brasileiras que não autorizaram a divulgação de seus nomes. Por este motivo, serão descritos apenas os modelos genéticos dos depósitos estudados.

#### **3.2.1. Depósito de bauxita**

A origem do nome bauxita faz referência à Les Baux, cidade na França, onde o minério foi identificado pela primeira vez em 1821, pelo geólogo Pierre Berthier. (ABAL, 2017). A bauxita é uma rocha formada por processos intempéricos de laterização, da qual é extraído o alumínio.

Para que os processos intempéricos ocorram, são necessárias condições favoráveis de clima, com sazonalidade no regime de chuva e da temperatura; de topografia, áreas bem drenadas e tectonicamente estáveis; de disponibilidade de matéria orgânica para remobilização e reações químicas; e de tempo de exposição das rochas aos processos intempéricos (Toledo, Oliveira e Melfi, 2000).

Segundo Toledo, Oliveira e Melfi (2000), o Brasil, por seu contexto geológico, apresenta condições favoráveis às ações intempéricas desde o período terciário, o que resultou em cerca de 70% de seu território coberto por formações lateríticas. Os principais bens minerais concentrados por laterização são Fe, Mn, Al, Ni, Nb e fosfatos.

Toledo, Oliveira e Melfi (2000), classificam os depósitos lateríticos em duas categorias quanto aos processos genéticos:

- Preservação do mineral primário de interesse e sua concentração por acumulação. Nesse caso o mineral de interesse é relativamente estável e resistente ao intemperismo, permanece no perfil de alteração, enquanto os outros minerais são alterados e/ou lixiviados do perfil.
- Destruição do mineral primário e formação de minerais secundários mais enriquecidos no elemento de interesse do que os minerais primários.

O depósito laterítico de bauxita é um exemplo da segunda categoria apresentada, com um diferencial quanto ao controle litológico, pelo fato de o alumínio ser um elemento abundante na crosta terrestre e pouco solúvel em superfície, concentrar-se facilmente com a lixiviação dos outros elementos, possibilitando assim que a bauxita se forme a partir da laterização de qualquer rocha rica em alumínio (Toledo, Oliveira e Melfi, 2000).

Os principais depósitos de bauxita no Brasil estão no estado do Pará e constituem depósitos do tipo platôs, de grande extensão, frequentemente capeados por argila amarela a vermelha, conhecida por Argila de Belterra (Costa, 2016).

O depósito de bauxita estudado localiza-se na porção oeste do estado Pará, na bacia do Baixo-Amazonas, hospedado na formação Alter do Chão, caracterizada por sedimentação clástica de origem continental (Boulangé e Carvalho, 1997).

A ocorrência do depósito se dá na forma de platôs com os topos inclinados suavemente (1 a 5°) em direção ao rio Amazonas (Carvalho, 1989). O perfil do depósito é caracterizado do topo para a base por: camada caulínica, bauxita nodular; camada nodular ferruginosa, camada bauxítica e camada argilosa. Este perfil foi descrito por Carvalho (1989), conforme resumo abaixo:

A camada caulínica apresenta altos teores de alumina e sílica, é constituída por um material caulínico com teor de ferro, apresentando goethita em sua porção superior, que grada para hematita em profundidade. Possui matriz argilosa com grãos de quartzo (< 0,8 mm) e nódulos aluminosos e ferruginosos (< 0,5 mm). A transição para o nível de bauxita nodular é gradual, com a diminuição da caulinita e o aumento de gibbsita. A espessura da camada é de 8 a 10 m na parte central e de 0 a 5 m nas bordas.

A camada de bauxita nodular possui matriz aluminosa, alto teor de alumina nos nódulos aluminosos, e baixo teor de sílica. É constituída principalmente por gibbsita microcristalina na forma de nódulos e veios, associada à caulinita. De forma secundária ocorrem nódulos ferruginosos que aumentam de tamanho conforme a profundidade. A espessura da camada é de 1 a 3 m, e o contato com o nível seguinte é transicional e tem cerca de 10 cm.

A camada nodular ferruginosa é pobre em alumina e sílica, possui na parte superior (30 cm) coloração rósea, e é constituída por nódulos ferruginosos (gibbsita e goethita) cimentados por matriz gibbsítica dura. Na parte intermediária (60 cm) apresenta coloração



amarelada, nódulos ferruginosos em uma matriz argilomorfa. A parte inferior assemelha-se à superior e difere na espessura, que é de 10 cm.

A camada bauxítica é a que apresenta o menor teor de sílica do perfil, é rica em alumina, sua composição é essencialmente alumino-ferruginosa, é recoberta por uma couraça ferruginosa que possui zonas claras ricas em alumínio e zonas escuras ricas em ferro. O minério se localiza na parte inferior deste horizonte, que se constitui por bauxita friável e porosa de coloração vermelha, contendo gibbsita em grânulos em uma matriz gibbsítica (zona clara) e ferruginosa (zona escura), a porosidade aumenta em direção à base e é preenchida por gibbsita recristalizada. Esse nível é cortado por bolsões verticais que contêm blocos residuais e fragmentos de bauxita misturados a um material argiloso de coloração vermelho-amarelada. A camada bauxítica apresenta espessura de até 6 m.

A camada argilosa possui empobrecimento em alumina e enriquecimento em sílica com relação à camada superior (bauxítica). É constituída por matriz caulínica com nódulos aluminosos e ferruginosos, e coloração variegada (branco, amarelo e castanho); este horizonte é cortado por finas paredes de gibbsita.

O modelo genético dos perfis de alteração pelos quais são formados os depósitos de bauxita da Amazônia oriental ainda está em discussão (Kotschoubey *et al.*, 2005). Para Boulangé e Carvalho (1997), a hipótese mais provável é a de que a gênese do depósito ocorreu *in situ*, por uma evolução contínua da alteração das rochas sedimentares argilo-arenosas, em condições climáticas de equatoriais a tropicais, com duração do início do Terciário até os tempos atuais.

### 3.2.2. Depósito de zinco

O depósito é localizado na região noroeste do estado de Minas Gerais, sendo inserido na margem oeste do Cráton São Francisco, na parte externa do segmento sul da Faixa de Dobramento Brasília, e hospedado no Grupo Vazante, na Formação Serra do Poço Verde (Dardenne, 2000; Monteiro, 2002).

O Grupo Vazante é constituído por uma espessa sequência marinha pelito-carbonática, que cobre uma área de cerca de 250 km, com orientação geral N-S, inserido em um sistema de *nappes* e falhas de empurrão com vergência para o Cráton do São Francisco. (Dardenne, 2000). A Formação Serra do Poço Verde é constituída predominantemente por uma sequência dolomítica, e é dividida da base para o topo em quatro membros (Dardenne, 2000):

- Membro Morro do Pinheiro Inferior: inclui dolomitos cinza claro e rosa, maciço ou com laminações algais, intercalados com níveis de doloarenito oncolíticos, brecha intraformacional e lentes de estromatólitos colunares. Espessura aproximada: 500 m.

- Membro Morro do Pinheiro Superior: inclui dolomitos de coloração cinza média a escura, com laminações algais, intercalados com lentes de doloarenitos com brecha lamelar, e folhelhos carbonosos. A espessura varia de 300 a 500 m.
- Membro Pamplona Inferior: inclui filitos carbonáticos, ardósia carbonosa cinza claro, lilás e esverdeada com intercalações de dolomito cinza claro a rosa com laminações algais. Espessura aproximada: 500 m.
- Membro Pamplona Médio: inclui dolomitos cinza-claro a rosa, intercalados de doloarenito com brecha lamelar e raras lentes de folhelho preto. Espessura aproximada: 400 m.

Monteiro (2002), destaca que nas unidades dos membros Pamplona e Morro do Pinheiro ocorrem corpos métricos de metabasitos tectonicamente imbricados ao longo da Zona de Falha de Vazante.

A principal mineralização de zinco do depósito hospeda-se no Membro Pamplona Inferior, em zona de falha de atitude aproximada de N50E/60NW, interpretada como uma falha sin-sedimentar, reativada na fase compressional do Evento Brasileiro, desenvolvendo-se como uma falha transcorrente sinistral e inversa após a deformação regional, e como uma falha normal lítrica no final do Brasileiro (Dardenne, 1978; Monteiro, 2002). Nesse contexto a mineralização possui controle estrutural, apresentando estruturas subsidiárias, antitéticas e extensionais; e estratigráfico, próximo ao contato entre o Membro Morro do Pinheiro Superior e Membro Pamplona Inferior (Monteiro, 2002).

A mineralização ocorre associada à alteração hidrotermal, dividida em três fases (Monteiro, 2002):

- Fase pré-mineralização: intensa silicificação, dolomitização, ankeritização e alteração fissural.
- Fase de sin-mineralização: intensa alteração fissural com formação de brechação hidráulica.
- Fase pós-mineralização: substituição das rochas mineralizadas por hematita, dolomita e clorita subordinada.

De acordo com Olivo *et al.* (2018), a dificuldade de mensurar a quantidade exata de enriquecimento de metais no depósito é devida a estes processos hidrotermais. De uma forma geral a quantidade de zinco no minério é da ordem de um milhão de vezes maior do que nas rochas hospedeiras.

A mineralização é subdividida em dois grupos (Monteiro, 2002, Monteiro *et al.*, 2006):

- Mineralização primária: com principal mineral de minério a willemita, ocorrendo em bolsões, tectonicamente imbricados em metadolomitos brechados, metabasitos, e em corpos menores de sulfeto. É posterior ao pico metamórfico e sincrônica ao desenvolvimento da zona de cisalhamento. O minério é constituído

por willemita (70-50%), dolomita (40-10%), quartzo (15-10%), hematita (20-05%), barita (< 5%), apatita (< 5%), franklinita (< 5%), zincita (< 5%) e magnetita (< 1%).

- Mineralização secundária: minério calamínico, ocorre em superfície, associado a brechas de colapso em ardósias, folhelhos e dolomitos do Membro Pamplona Superior, controladas por fraturas e falhas NE. O minério é constituído predominantemente por hemimorfita, hidrozinca, smithsonita e, mais raramente, piromorfita.

Os principais minerais de ganga são a dolomita e a hematita.

O depósito em questão é de zinco não sulfetado hipógeno, pois o principal mineral de minério é o silicato de zinco, a willemita ( $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ ), e ocorre em profundidade, classificado como tipo Vazante por Monteiro (2002), antes da definição de Hitzman *et al.* (2003) de depósitos de zinco não sulfetado tipo hipogênico estruturalmente controlado.

O modelo genético proposto por Monteiro (2002) é de interação de fluidos com as rochas hospedeiras, resultando em intensa alteração hidrotermal. Estes fluidos são canalizados na zona de cisalhamento e fruto da mistura entre fluidos metalíferos quentes (> 250°C) salinos com baixo conteúdo de enxofre reduzido, com fluidos meteóricos com alta fugacidade de oxigênio e enxofre.

### 3.3. Amostragem

Amostragem, para a TOS, pode ser definida como um processo de seleção de amostra que se considera representar o todo, tendo como objetivo reduzir a massa de um dado lote (L) sem alterar suas características originais, para que seja possível inferir a característica de interesse do lote através da análise desta característica na amostra (Chierigati e Pitard, 2012).

Segundo Chierigati e Pitard (2018), lote (L) é uma quantidade de material com limites definidos, da qual incrementos e amostras são selecionados. O incremento (I), por sua vez, é um grupo de partículas extraído do lote (L) por um dispositivo de amostragem em uma única operação. Uma amostra (S) é necessariamente parte do lote (L) e é obtida pela reunião de incrementos destinados a representar o lote nas operações seguintes.

A amostra deve ter as características comuns a toda população dentro de um intervalo aceitável de precisão e acurácia. A precisão refere-se à proximidade entre os valores obtidos pela repetição do processo de seleção, enquanto a acurácia se refere à proximidade da medida relativamente ao valor verdadeiro da variável (Chierigati e Pitard, 2018). Estes conceitos que, juntos resultam no conceito de representatividade, são ilustrados na Figura 1.

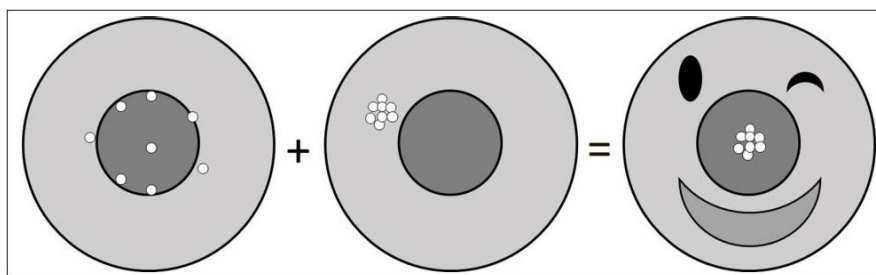


Figura 1 – Conceito ilustrativo de representatividade. 1º alvo: acurácia (proximidade entre os valores obtidos pela repetição do processo de seleção); 2º alvo: precisão (proximidade da medida relativamente ao valor verdadeiro); 3º alvo: representatividade (Chieregati e Pitard, 2018).

A amostragem em mineração é um processo especialmente complexo devido à variabilidade natural dos minérios. Um lote de material, mesmo que proveniente de um minério de baixa variabilidade natural, não terá seus elementos idênticos entre si, ou seja, não é homogêneo, portanto, um material amostrado a partir de um depósito mineral será necessariamente heterogêneo. Como consequência da heterogeneidade do material, surgem erros no processo de estimação, e controlar estes erros é o objetivo da Teoria da Amostragem de Pierre Gy.

A teoria de Pierre Gy analisa as propriedades dos erros em função do processo de seleção de amostras e do material amostrado (Chieregati e Pitard, 2018). Em relação às propriedades do material, a heterogeneidade é a que constitui a fonte de todos os erros de amostragem (Gy, 1998), e é dividida em heterogeneidade de constituição e heterogeneidade de distribuição.

A heterogeneidade de constituição é o tipo de heterogeneidade das propriedades fundamentais dos fragmentos de um lote, ou seja, constituição mineralógica, densidade, forma e granulometria do material amostrado. A heterogeneidade de distribuição é dependente da heterogeneidade de constituição e da segregação, pois é definida como a distribuição espacial heterogênea dos fragmentos em um lote (Chieregati e Pitard, 2018). A heterogeneidade de distribuição de um lote implica em um rearranjo natural dos fragmentos, causado por forças gravitacionais, resultando em uma segregação em grupos de fragmentos de acordo com suas propriedades (por exemplo: tamanho e densidade), acrescentando um erro à seleção de amostras, o erro de segregação e agrupamento (GSE - *Grouping and Segregation Error*) (Chieregati e Pitard, 2018).

Portanto uma amostra de um lote é influenciada por um erro especificamente relacionado à heterogeneidade de constituição, chamado de erro fundamental de amostragem (FSE ou *Fundamental Sampling Error*), e por um erro especificamente relacionado à heterogeneidade de distribuição, chamado de erro de segregação e agrupamento (GSE).

### 3.3.1. Erro fundamental de amostragem (FSE)

Se, durante a amostragem, os fragmentos possuem a mesma probabilidade de seleção, e esta é feita aleatoriamente, surge um erro de amostragem entre o teor real do lote e o da amostra selecionada. Esse erro é denominado erro fundamental de amostragem (François-Bongarçon e Gy, 2002).

O FSE é caracterizado por sua variância, calculada pela “fórmula de Gy” (Gy, 1979; 1992), representada a seguir:

$$s^2_{FSE} = c f g l d^3 \left( \frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right)$$

Onde:

- $s^2_{FSE}$  é a variância relativa do erro fundamental de amostragem;
- $c$  é o fator mineralogia, calculado por:  $c = \gamma_M \frac{(1 - a_L)^2}{a_L} + \gamma_g (1 - a_L)$   
 $\gamma_M$  a densidade do mineral de interesse,  
 $\gamma_g$  a densidade média dos minerais de ganga,  
 $a_L$  o teor do mineral de interesse no lote, em decimal;
- $f$  é o fator forma, onde:  
 $f = 0,1$  para minerais laminares  
 $f = 0,2$  para materiais moles e submetidos a tensões mecânicas  
 $f = 0,5$  para a maioria dos minerais  
 $f = 0,523$  para fragmentos esféricos;
- $g$  é o fator granulometria  
 $g = 0,25$  para minerais não calibrados  
 $g = 0,55$  para materiais calibrados (resultantes do peneiramento entre duas malhas)  
 $g = 0,75$  para materiais naturalmente calibrados (grãos);
- $l$  é o fator liberação; pode-se atribuir-lhe um valor conforme o grau de heterogeneidade do material:  
 $l = 0,05$  para materiais muito homogêneos  
 $l = 0,10$  para materiais homogêneos  
 $l = 0,20$  para materiais medianos

$l = 0,40$  para materiais heterogêneos

$l = 0,80$  para materiais muito heterogêneos;

- $d$  o tamanho máximo dos fragmentos ou  $d_{95}$ , a abertura da malha por onde passam 95%, em massa, do material;
- $M_s$  é a massa da amostra;
- $M_L$  é a massa do lote.

### 3.3.2. *Teste de Heterogeneidade*

Como estratégia para minimização e controle dos erros do processo de amostragem deve-se medir a heterogeneidade intrínseca (ou constitucional) do material antes de se decidir por uma operação de amostragem adequada (Chierigati e Pitard, 2018).

A heterogeneidade intrínseca pode ser calculada pela multiplicação dos fatores da fórmula de Gy ( $c, f, g, l, d^3$ ), ou estimada experimentalmente pelo teste de heterogeneidade (Chierigati e Pitard, 2018). O teste de heterogeneidade é realizado para calibrar a fórmula de Gy para cada tipo específico de minério; através dele são estimadas as constantes  $K$  (multiplicação dos fatores de Gy) e  $\alpha$  (expoente do diâmetro). Para se estimarem estas constantes é calculado o “fator constante de heterogeneidade constitucional” ou “heterogeneidade intrínseca do lote” ( $IH_L$ ) e o diâmetro nominal dos fragmentos ( $d$ ). Segundo Pitard (1993), a estimativa do fator  $IH_L$  é dada através da fórmula:

$$EST\ IH_L = g \sum_i \frac{(a_i - a_L)^2 M_s^2}{a_L^2 M_L}$$

Em que:

- $g$  = o fator granulometria;
- $a_i$  = o teor da amostra;
- $a_L$  = o teor médio do lote:  $a_L = \frac{1}{M_L} \sum a_i \times M_s$
- $M_s$  = a massa da amostra;
- $M_L$  = a massa do lote.

Já para o diâmetro nominal, utiliza-se a fórmula:  $d_n = \sqrt[3]{\frac{d_1^3 + d_2^3}{2}}$

Sendo  $d_1$  e  $d_2$  as aberturas das malhas utilizadas no peneiramento (superior e inferior), em centímetro.

As constantes K e  $\alpha$  são estimadas através da linha de tendência de potência dos pontos, de um gráfico di-log, no qual o eixo da abscissa é referente ao diâmetro nominal ( $d_n$ ), e o eixo das ordenadas, pela estimativa do  $IH_L$  (Pitard, 1993). Obtidas as constantes, é calculada a variância relativa do erro fundamental de amostragem e a fórmula original de Gy passa a ser:

$$s^2_{FSE} = \underbrace{c_{fgl}}_K d^{\frac{\alpha}{3}} \left( \frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right) \longrightarrow s^2_{FSE} = K d^{\alpha} \left( \frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right)$$

Com a calibração da fórmula de Gy se obtém um resultado mais preciso e acurado para um determinado depósito mineral, possibilitando desenvolver o protocolo de amostragem mais apropriado para cada tipo específico de minério.

Protocolo de amostragem é um registro que contém todos os estágios de seleção e de preparação de amostras, na forma de um fluxograma, com sequência que se inicia com a extração da amostra primária até a obtenção da amostra analítica. (Chieregati e Pitard, 2018). Para se otimizar um protocolo de amostragem, calculam-se as constantes K e  $\alpha$ , estima-se um desvio padrão máximo do erro fundamental de amostragem ( $s_{FSE}$ ) e, a partir da massa do lote que se quer amostrar ( $M_L$ ), calcula-se a massa mínima de amostra representativa desse lote ( $M_S$ ). Todos esses cálculos podem ser feitos usando a fórmula não calibrada de Gy ou usando a fórmula calibrada pelo teste de heterogeneidade. Um dos resultados deste trabalho mostra as diferenças entre duas fórmulas para os dois minérios estudados.

Na Figura 2 é possível visualizar de forma esquemática a relação de dependência entre os assuntos abordados neste trabalho.

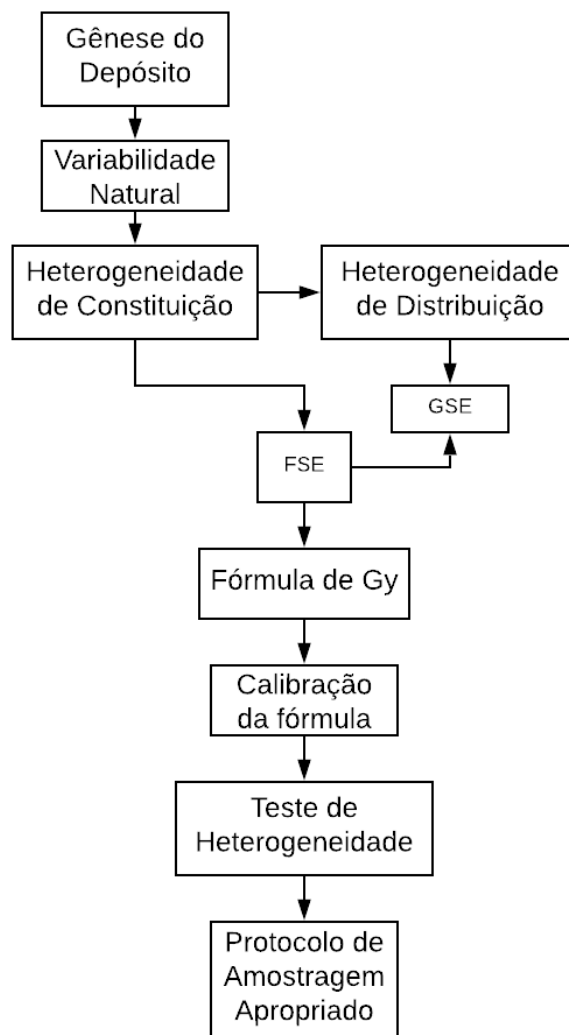


Figura 2 - Fluxograma da relação de dependência dos assuntos abordados neste trabalho. Para um protocolo de amostragem apropriado é necessário obter-se um FSE mínimo, este é determinado pela heterogeneidade de constituição, e minimizado pela calibração da fórmula de Gy (Elaborado pela autora).

Na Figura 2 é possível observar que a gênese do depósito condiciona a variabilidade natural que, por sua vez, determina a heterogeneidade de constituição, esta impõe uma segregação de grupos de fragmentos de acordo com suas propriedades (heterogeneidade de distribuição), acrescentando um erro à seleção de amostras, o erro de segregação e agrupamento (GSE). Em um processo amostral ideal o único erro que não pode ser eliminado é o erro fundamental de amostragem (FSE), determinado pela heterogeneidade de constituição, e calculado pela fórmula de Gy.

Para obter-se o FSE mínimo é feita a calibração da fórmula de Gy, através da realização de testes de heterogeneidade, para estimar a heterogeneidade intrínseca do minério e calibrar as constantes de amostragem  $K$  e  $\alpha$ , a calibração dessas constantes é essencial para o cálculo de massas mínimas de amostras representativas e a otimização de protocolos de amostragem.



## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Coleta das amostras

As coletas das amostras para os testes de heterogeneidade foram de responsabilidade das empresas e foram realizadas por técnicos sob supervisão da orientadora em setembro de 2017 e novembro de 2018. Foram selecionados para os testes aproximadamente 500 kg de cada tipo de minério (alumínio e zinco), massa esta bastante superior à massa mínima representativa da distribuição granulométrica do minério, ou seja, 59 kg, conforme equação abaixo (Chieregati e Pitard, 2018) e recomendações de Pitard (1993) para o desvio padrão do erro fundamental de amostragem, considerando a densidade média dos minerais de zinco e alumínio ( $\gamma_M$ ) igual a 4, o desvio padrão relativo do erro fundamental de amostragem ( $s_{FSE}$ ) igual a 10%, o fator forma (f) igual a 0,5 e o diâmetro máximo das partículas (d) igual a 2,54 cm.

$$M_S = 18 f \gamma_M \frac{d^3}{s_{FSE}^2} = 18 \times 0,5 \times 4 \times \frac{2,54^3}{0,10^2} = 58.993 \text{ g} = 59 \text{ kg}$$

As amostras de bauxita foram coletadas a partir de 8 cortes de aproximadamente 60 kg cada na correia de alimentação da torre de amostragem, e as amostras de zinco foram coletadas a partir de 8 cortes de aproximadamente 60 kg cada na correia de alimentação da usina de beneficiamento.

### 4.2. Britagem e peneiramento

Após o recebimento das amostras, foi realizada a secagem e a britagem abaixo de 1" (25,4 mm) em um britador de mandíbulas (Figura 3A) do Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais (LTM) do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da USP. O peneiramento foi feito a seco em peneiras vibratórias quadradas (Figura 3B).

Para as amostras de zinco, optou-se por fazer apenas o peneiramento, visto que o material já se encontrava abaixo de 1". Para as amostras de bauxita foram realizadas as etapas britagem e peneiramento. A Tabela 1 apresenta as frações granulométricas escolhidas para o peneiramento das amostras.

Tabela 1 - Frações granulométricas do peneiramento das amostras dos minérios de alumínio e zinco (Elaborada pela autora).

Peneiramento	
Abertura das peneiras	Lotes
(-25,4 mm + 12,7 mm)	L1
( -12,7 mm + 6,35 mm)	L2
(-6,35 mm + 4,75 mm)	L3
(-4,75 mm + 3,35 mm)	L4

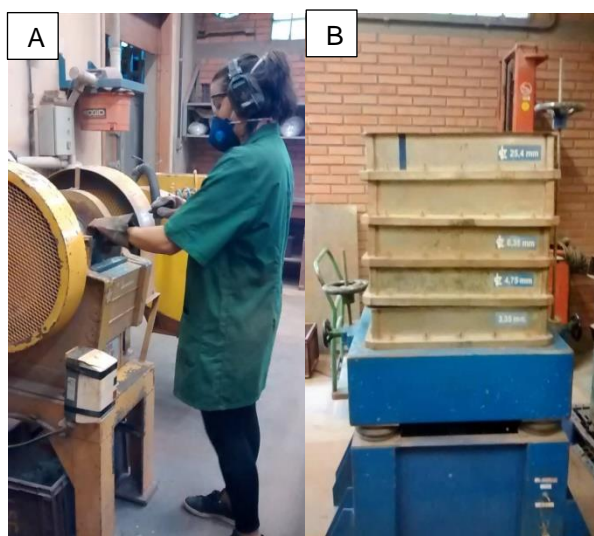


Figura 3 – Etapas de britagem das amostras abaixo de 1" (25,4 mm) em um britador de mandíbula (3a); e de peneiramento a seco em peneiras vibratórias quadradas (3b). (Fonte: própria)

A britagem e o peneiramento foram realizados pela aluna com ajuda dos técnicos do LTM.

#### 4.3. Divisão e teste de heterogeneidade

Decidiu-se utilizar para o teste apenas metade da massa inicial e arquivar a outra metade para testes futuros. Para isso, foi realizada a divisão da amostra original para reduzir a massa de forma equânime. Para as amostras da faixa granulométrica '-25,4 mm + 12,7 mm' foi realizada a divisão por pilha longitudinal (Figura 4A), e para as demais faixas granulométricas foi utilizado o divisor tipo Jones (Figura 4B), com 16 calhas (Figura 4C).

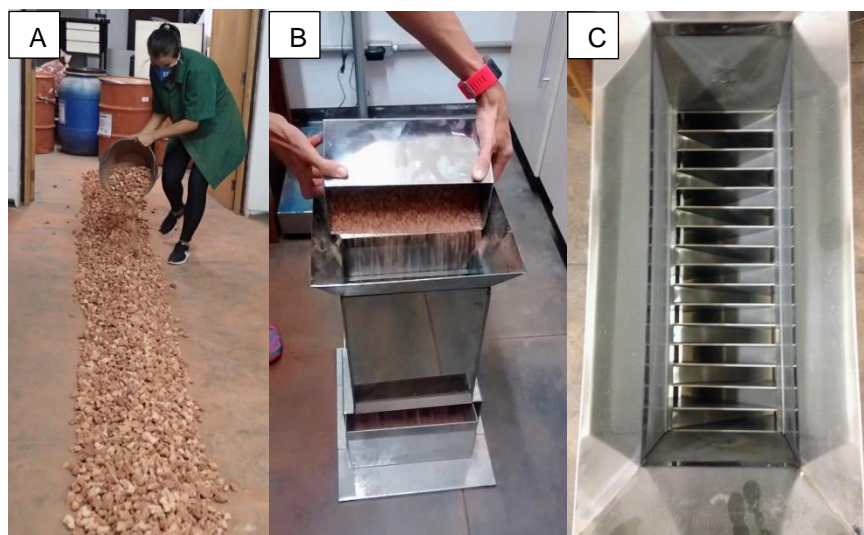


Figura 4 - Etapa de divisão da amostra, por pilha longitudinal lote L1 (4a); e utilizando o divisor tipo Jones (demais lotes) (4b), detalhe das calhas do divisor (4c) (Fonte: própria).

Após divisão, as amostras foram distribuídas em uma superfície lisa (mesa), de acordo com a malha adotada para cada faixa granulométrica, de forma que todos os grãos fossem acessíveis e tivessem a mesma probabilidade de seleção. A Tabela 2 apresenta os dados das malhas adotadas para cada faixa granulométrica de cada minério.

Tabela 2 - Dados de tamanho e quantidade de células das malhas adotadas para os quatro lotes de bauxita e zinco (Elaborada pela autora).

<b>Lote</b>	<b>Lado da Célula</b>	<b>Malha da Bauxita (nº de células)</b>	<b>Malha do Zinco (nº de células)</b>
L1 (-25,4 mm + 12,7 mm)	300 mm	50	50
L2 ( -12,7 mm + 6,35 mm)	200 mm	90	90
L3 (-6,35 mm + 4,75 mm)	100 mm	360	280
L4 (-4,75 mm + 3,35 mm)	100 mm	540	280

A Figura 5 apresenta as malhas adotadas para a bauxita, conforme a Tabela 2, as malhas para os lotes L3 e L4 são diferentes do minério de zinco, essa diferença é discutida no item 5.2.1. A Figura 6 apresenta a malha adotada para o lote L4 do minério de zinco, o tamanho desta malha foi o mesmo para o lote L3. Os lotes L1 e L2 tiveram o mesmo tamanho de malha dos respectivos lotes da bauxita, apresentados na Figura 5A e 5B respectivamente.

O tamanho da malha se deu em função da massa de cada grão e da quantidade necessária de massa de amostra final para a análise química. Dessa forma, para as frações granulométricas menores foram feitas malhas com maior número de células de menor

tamanho, e para as frações granulométricas maiores foram realizadas malhas com menor número de células de maior tamanho.

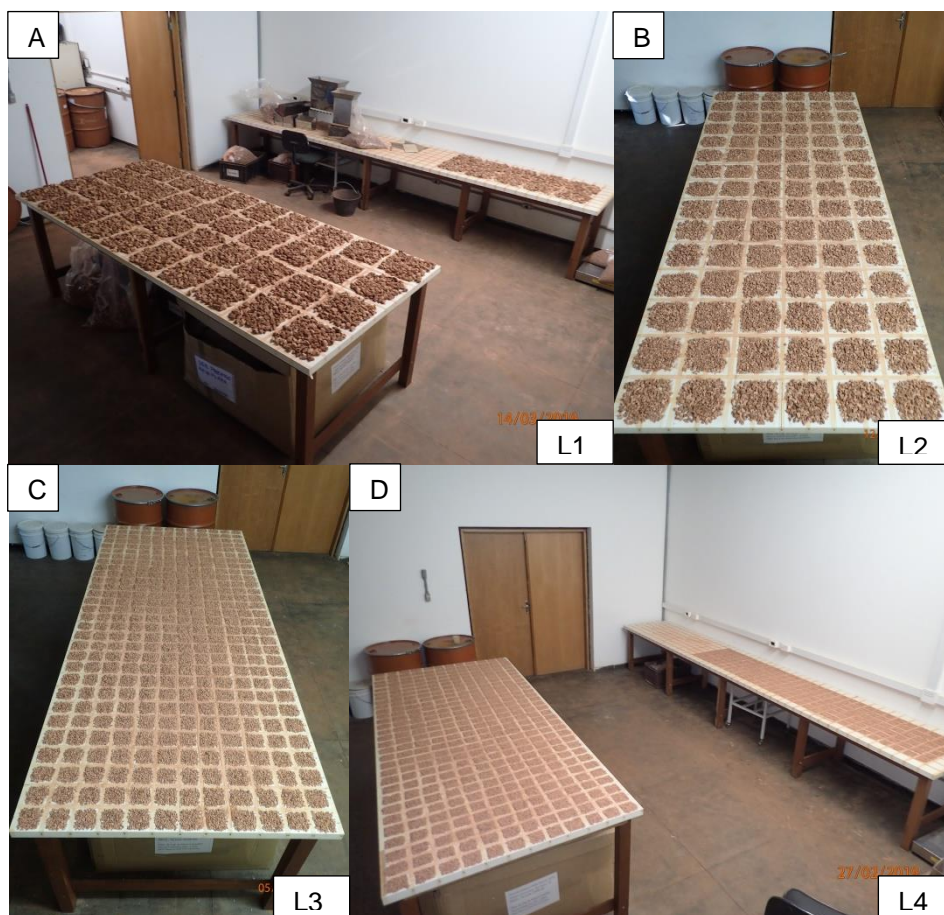


Figura 5 – Malhas dos lotes da bauxita: L1 com 50 células (A); L2 com 90 células (B); L3 com 360 células (C) e L4 com 540 células (D) (Fonte: própria).



Figura 6 - Malha adotada para o lote L4 com 280 células, para o minério de zinco (Fonte: própria).

Depois da malha finalizada, foi realizada a coleta de um fragmento de cada célula da malha, de forma aleatória, um a um, simulando o procedimento ideal de amostragem (Figura 7A). Após a coleta de um fragmento por malha, o material foi disposto em saco plástico,



pesado (Figura 7B) e identificado com um número de amostra para aquela fração granulométrica (Figura 7C). O procedimento de coleta de fragmentos foi, então, repetido 50 vezes.

Portanto, para cada fração granulométrica, foram formadas 50 amostras, cada uma contendo uma quantidade de fragmentos igual à quantidade de células da malha. Essas amostras foram pesadas e enviadas para análise química e determinação de teores.



Figura 7 – Coleta de um fragmento de cada uma das 50 células da malha do lote L1 (A); pesagem de uma amostra do lote L4 (composta por 540 fragmentos) (B); amostras dos quatro lotes da bauxita, devidamente pesadas e identificadas (Fonte: própria).

A divisão e o teste de heterogeneidade foram realizados pela aluna e a orientadora no Laboratório de Amostragem e Manuseio de Sólidos Granulados (LAM) da Escola Politécnica da USP.

#### 4.4. Análises químicas

As análises químicas foram de responsabilidade das empresas de mineração das quais os minérios se originaram. Para a bauxita foi analisada a alumina aproveitável (AA) e a sílica reativa (SR). Para o minério de zinco foi realizada análise química por fluorescência de raios-X (FRX) a partir de pastilha fundida.

#### 4.5. Análise por microscopia óptica

Com o objetivo de identificar os principais minerais, e se há mudanças na quantidade e forma de ocorrência por faixa granulométrica, foi confeccionada uma lâmina delgada dos grãos por faixa dos testes de heterogeneidade, sendo 4 lâminas por minério, totalizando 08 lâminas.

O procedimento adotado foi de colar o máximo de grãos possível em uma resina, fixar na lâmina de vidro, polir na face oposta com abrasivo, secar e finalizar com uma placa de vidro. A espessura final da lâmina foi de aproximadamente 40 micrômetros. As lâminas foram confeccionadas pelos técnicos da Seção de Laminação do IGc - USP.

Com base nas lâminas polidas representativas de cada faixa granulométrica, realizou-se a identificação dos principais minerais presentes nas amostras. A investigação por microscopia ótica foi realizada no Laboratório Didático de Microscopia Petrográfica do IGc – USP, com auxílio do microscópio petrográfico binocular Olympus BXP-40F-3.

Para que os grãos separados para análise microscópica fossem representativos das faixas granulométricas, foi realizada a separação de forma simultânea aos testes de heterogeneidade. A Figura 8 ilustra a sequência dos processos envolvidos nos materiais e métodos empregados neste estudo.

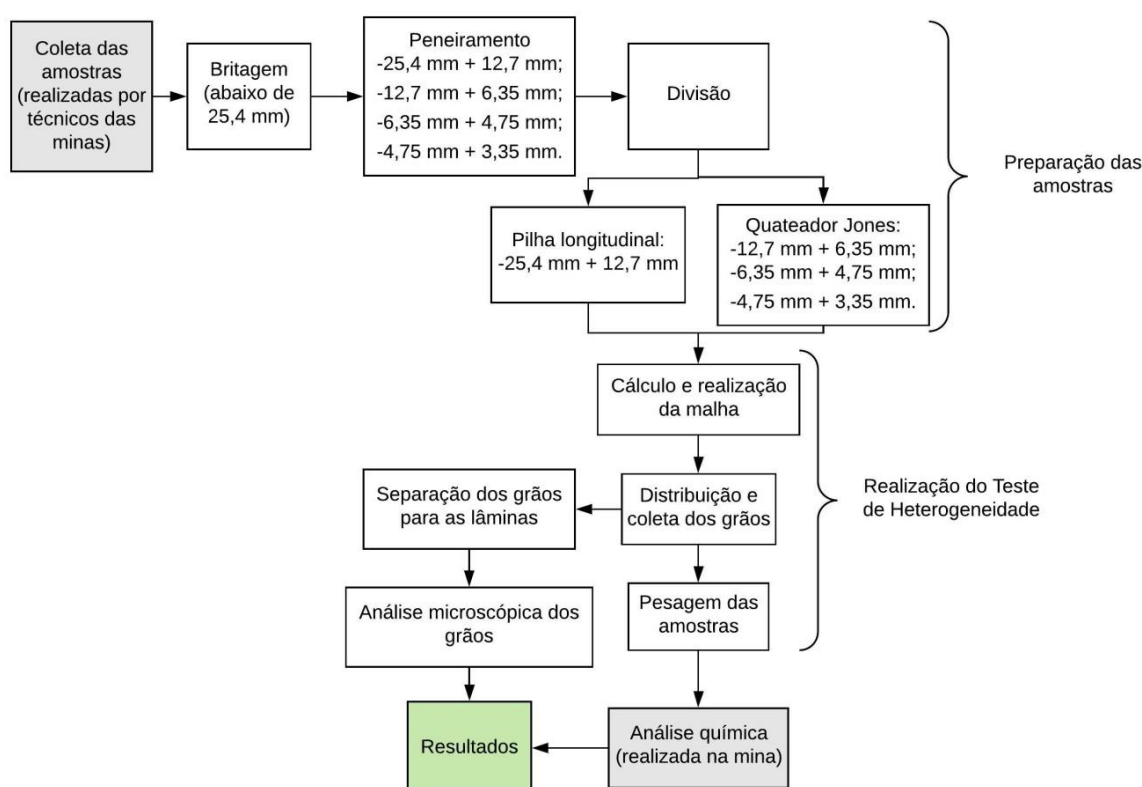


Figura 8 - Fluxograma dos processos envolvidos nos materiais e métodos realizados neste estudo (Elaborado pela autora).

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

A proposta inicial deste trabalho era de relacionar a heterogeneidade intrínseca dos diferentes tipos de minério (parâmetros de amostragem  $K$  e  $\alpha$ ) com a variabilidade natural dos minérios de alumínio (bauxita), zinco e ouro, porém os resultados da análise química para as amostras de bauxita e ouro não foram recebidos em tempo hábil para o relatório final. Diante disto, optou-se por usar os dados apresentados por Prado (2018) referentes ao mesmo minério utilizado pela autora, com preparação de amostra e método de análise química, idênticas às realizadas neste estudo.

Para o depósito de ouro em questão, não há dados anteriores de teste de heterogeneidade e, por esta razão, a apresentação e a discussão dos dados referentes a este minério foram suprimidas deste trabalho. São apresentados os dados obtidos para os minérios de alumínio e de zinco, sendo um subitem para a análise microscópica dos grãos e outro para o teste de heterogeneidade.

### 5.1. Heterogeneidade de constituição

Para a análise microscópica, buscou-se colocar o máximo de grãos por lâmina, sendo possíveis 89 para o minério de alumínio (bauxita), e 72 para o minério de zinco, totalizando 161 grãos. Na Tabela 3 está a quantidade de grãos analisados por faixa granulométrica.

Tabela 3 - Quantidade de grãos das lâminas dos minérios de alumínio e zinco (Elaborada pela autora).

Lote	Quantidade de grãos por lâmina	
	Bauxita	Zinco
L1 (-25,4 mm + 12,7 mm)	2	4
L2 ( -12,7 mm + 6,35 mm)	8	11
L3 (-6,35 mm + 4,75 mm)	29	26
L4 (-4,75 mm + 3,35 mm)	50	31
Total por minério	89	72
Total analisado	161	

Para uma melhor compreensão são apresentadas as texturas e as feições predominantes das amostras de mão e dos grãos vistos em lâmina, com destaque para os principais minerais de minério e seus minerais de ganga, com descrição subdividida em minério de alumínio (bauxita) e minério de zinco. Para a descrição das lâminas foi utilizado como apoio o banco de dados *online* do Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert, 2017, do Instituto de Geociências e Ciências Exatas IGCE - UNESP.

### 5.1.1. Minério de Alumínio (Bauxita)

Para a maior faixa granulométrica '-25,4 mm + 12,7 mm' em amostras de mão foram observados fragmentos subesféricos, por vezes alongados, de coloração predominantemente marrom avermelhada, com regiões mais claras tendendo ao bege róseo, com algumas manchas amareladas (Figura 9). A bauxita apresenta-se maciça, não estruturada, com poros milimétricos arredondados.

Na lâmina B-12 foram observados dois grãos, semelhantes entre si, compostos por uma matriz gibbsítica microcristalina (0,04 a 0,1 mm) impregnada de uma alteração de textura fina de coloração amarronzada a nicóis descruzados (Figura 10). A matriz possui poros de formas arredondadas a sub-arredondadas, e fissuras de formas variadas, ambas preenchidas principalmente por gibbsita mesocristalina (0,2 a 1,5 mm) com geminação polissintética (Figura 11). Em menor quantidade as fissuras e alguns poros são preenchidos por opacos (0,04 a 1,5 mm), alguns possuem inclusões de gibbsita mesocristalina (Figura 12). Observou-se entre a matriz e alteração de textura fina, cristais de goethita subedral com tamanho variando entre 0,05 mm a 0,1 mm. Para a lâmina da faixa granulométrica '-25,4 mm + 12,7 mm' estimou-se 45% de matriz gibbsítica impregnada de alteração; 30% de gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) mesocristalina; 15% de minerais opacos e 10% de goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ).

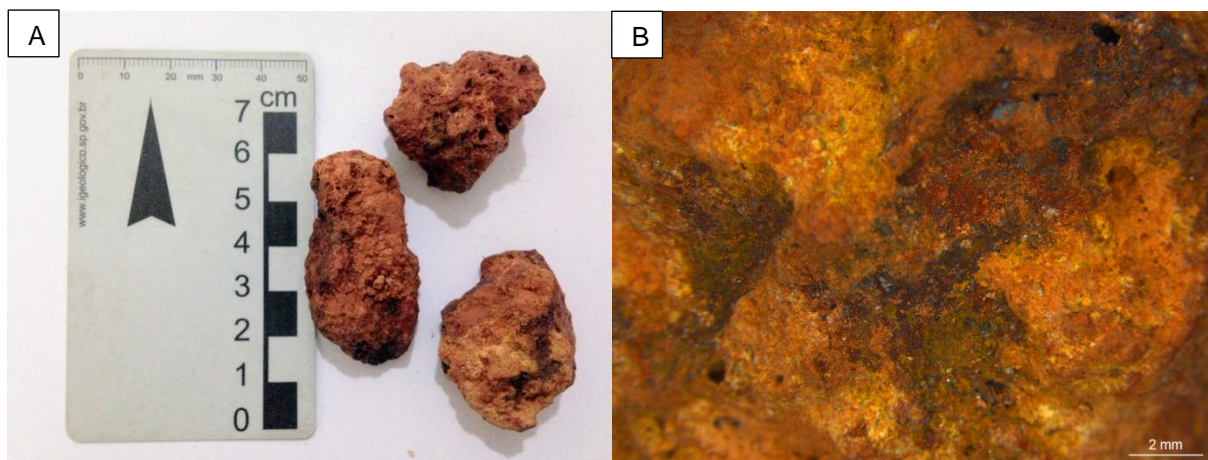


Figura 9 - Amostra de mão de bauxita do lote L1. Fragmentos subesféricos, alongados, de coloração predominantemente marrom avermelhada, com regiões mais claras tendendo ao bege róseo (A); detalhe de um fragmento com manchas amareladas (B) (Fonte: própria).



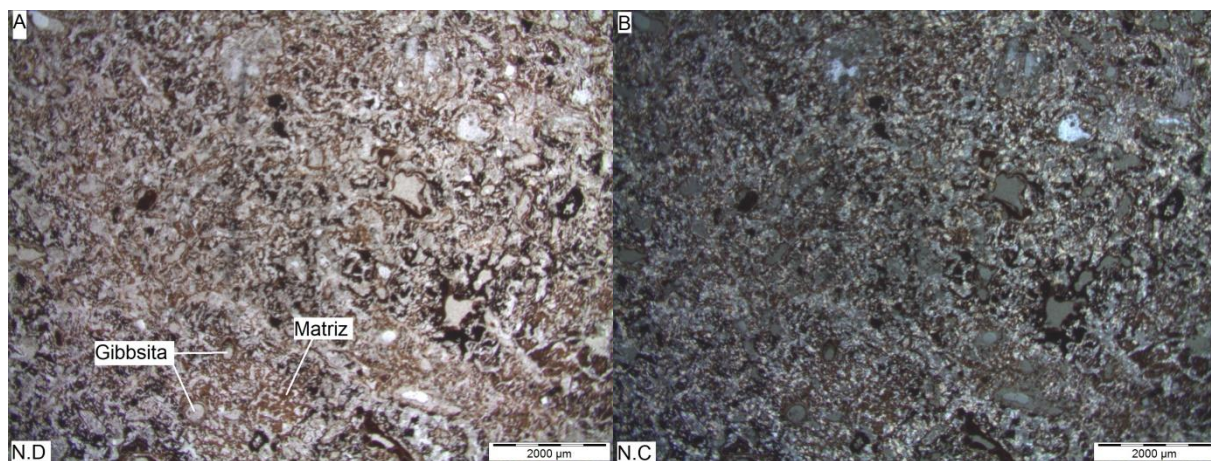


Figura 10 – Imagem em lâmina de um grão do lote L1 da bauxita. Observa-se matriz gibbsítica microcristalina impregnada de uma alteração de textura fina de coloração amarronzada, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).

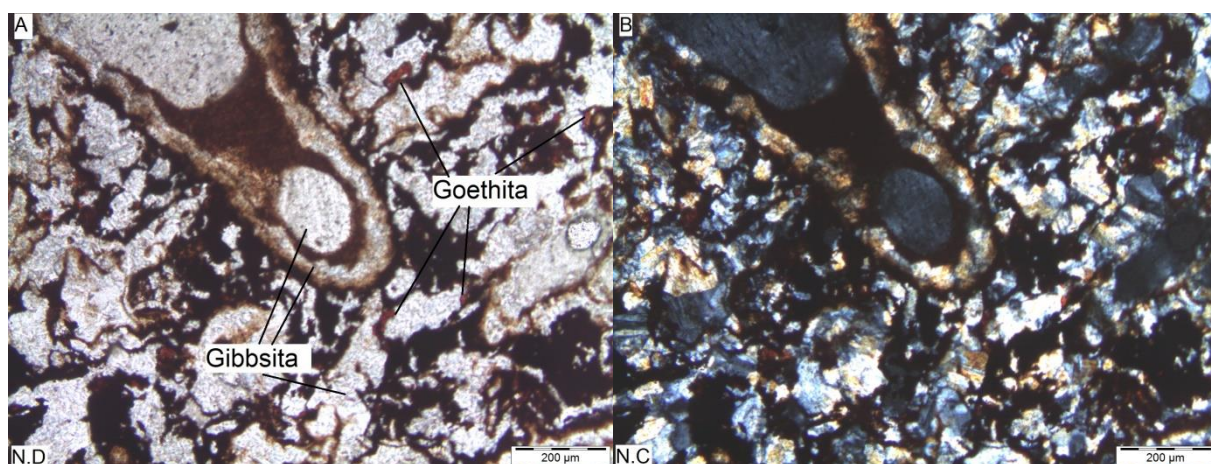


Figura 11 - Imagem em lâmina de um grão do lote L1 da bauxita. Gibbsita mesocristalina com geminação polissintética e goethita subedral, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).

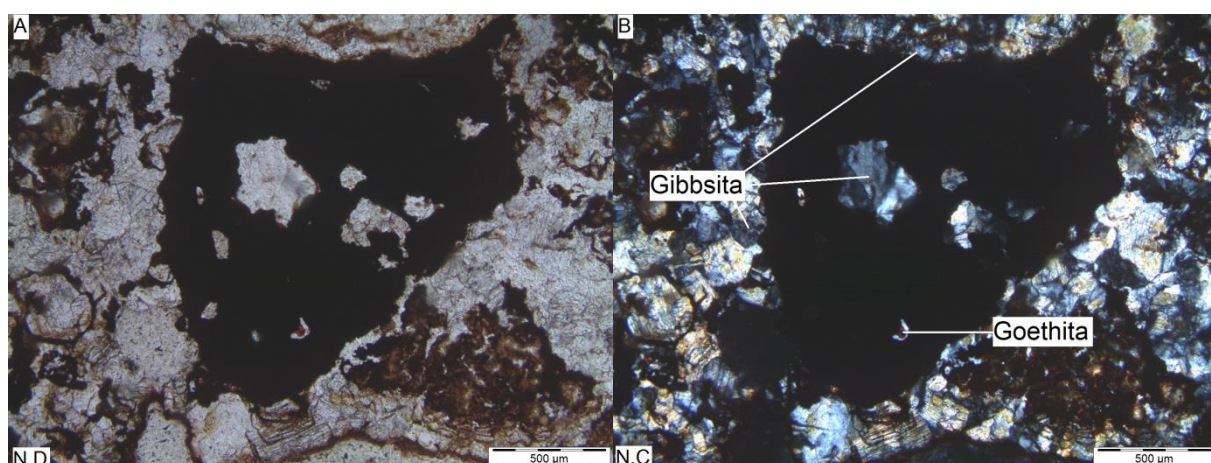


Figura 12 – Imagem em lâmina de um grão do lote L1 da bauxita. Preenchimento de poro por mineral opaco com inclusões de gibbsita mesocristalina, e goethita, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).



Para a faixa granulométrica '-12,7 mm + 6,35 mm', observou-se que, em relação à fração anterior, os fragmentos são mais angulosos e possuem a mesma descrição macroscópica (Figura 13). Em lâmina analisaram-se oito grãos, cinco apresentaram textura predominante de uma matriz gibbsítica mais alterada, de coloração mais escura e mais fina do que o observado na lâmina B-12. As fissuras observadas são mais encurvadas e os poros com contatos mais angulares, ambos preenchidos por gibbsita mesocristalina (Figura 14). As fissuras encurvadas variam de tamanho (< 0,1 a 0,75 mm), e os poros angulares variam de 0,1 a 0,3 mm. Em três grãos em regiões mais claras, observa-se goethita com hábito anedral, com tamanho variando entre 0,04 mm e 0,25 mm (Figura 15). Para a lâmina da faixa granulométrica '-12,7 mm + 6,35 mm', estimou-se 40% de matriz gibbsítica impregnada de alteração; 25% de gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) mesocristalina; 20% de minerais opacos e 15% de goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ).



Figura 13 – Amostra de mão de bauxita do lote L2. Fragmentos predominantemente angulosos, alongados, de coloração marrom avermelhada, com regiões mais claras tendendo ao bege róseo (A); detalhe de um fragmento poroso com alterações de cor amarelada (B) (Fonte: própria).

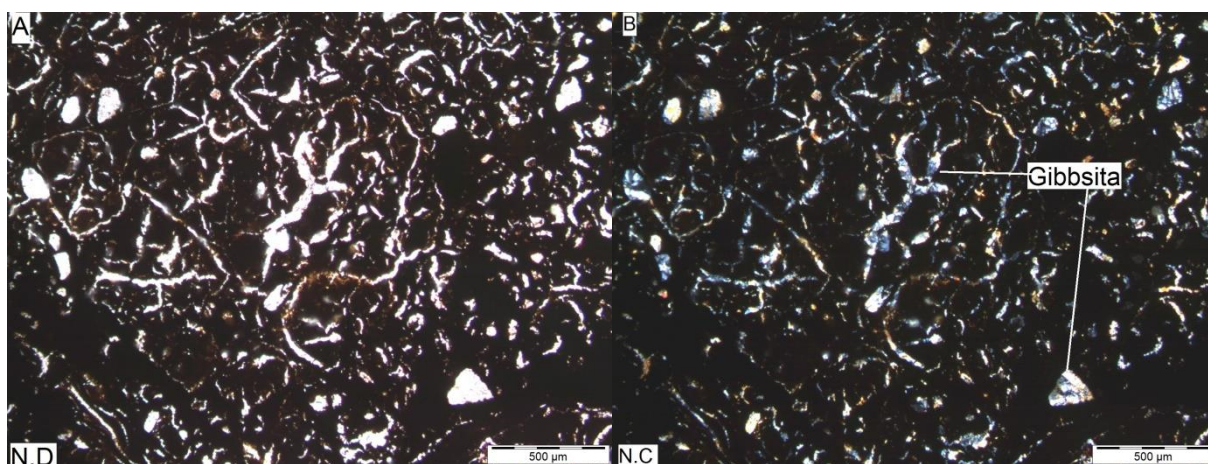


Figura 14 - Imagem em lâmina de um grão do lote L2 da bauxita. Observa-se gibbsita mesocristalina preenchendo fissuras com formas encurvadas, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).



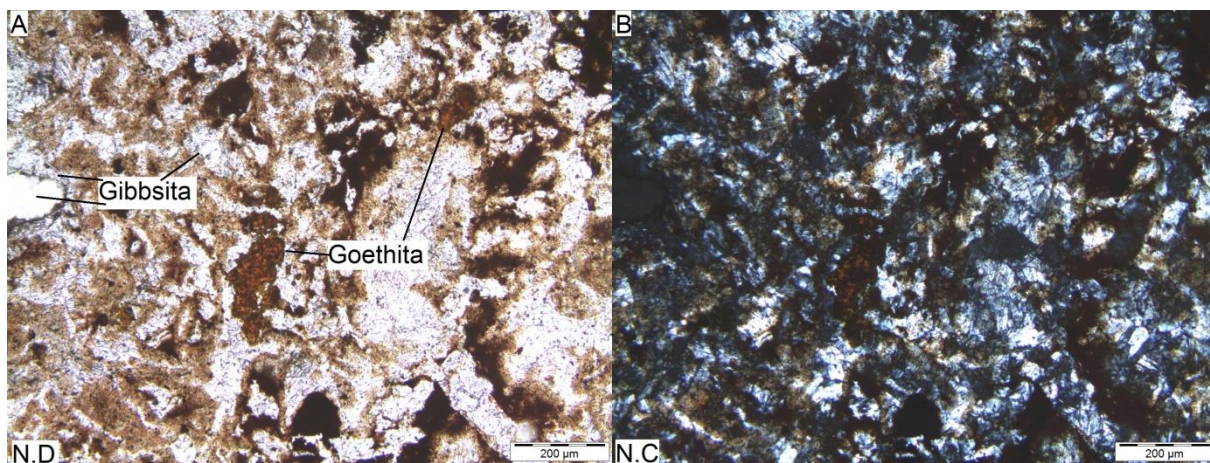


Figura 15 - Imagem em lâmina de um grão do lote L2 da bauxita. Observa-se goethita com hábito anedral e gibbsita mesocristalina, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).

Para a faixa granulométrica ‘-6,35 mm + 4,75 mm’ em amostras de mão observaram-se mais grãos com alterações amareladas e esbranquiçadas (Figura 16). Em lâmina analisaram-se 29 grãos, 18 grãos apresentam textura predominante de uma matriz gibbsítica muito fina com poros e fissuras preenchidas principalmente por massas de alteração marrom clara a nicóis descruzados (Figura 17); de forma secundária ocorrem preenchimentos por opacos com texturas de alteração. Em algumas regiões esses preenchimentos contêm inclusões de gibbsita mesocristalina (Figura 18).

Em 11 grãos foram observadas as fissuras encurvadas e poros angulosos como os descritos para a faixa granulométrica ‘-12,7 mm + 6,35 mm’ apresentados na Figura 14.

Para a lâmina da faixa granulométrica ‘-6,35 mm + 4,75 mm’, estimou-se 35% de matriz gibbsítica impregnada de alteração; 25% de alteração marrom clara preenchendo poros e fissuras; 20% de gibbsita  $\text{Al}(\text{OH})_3$  mesocristalina; 20% de minerais opacos.

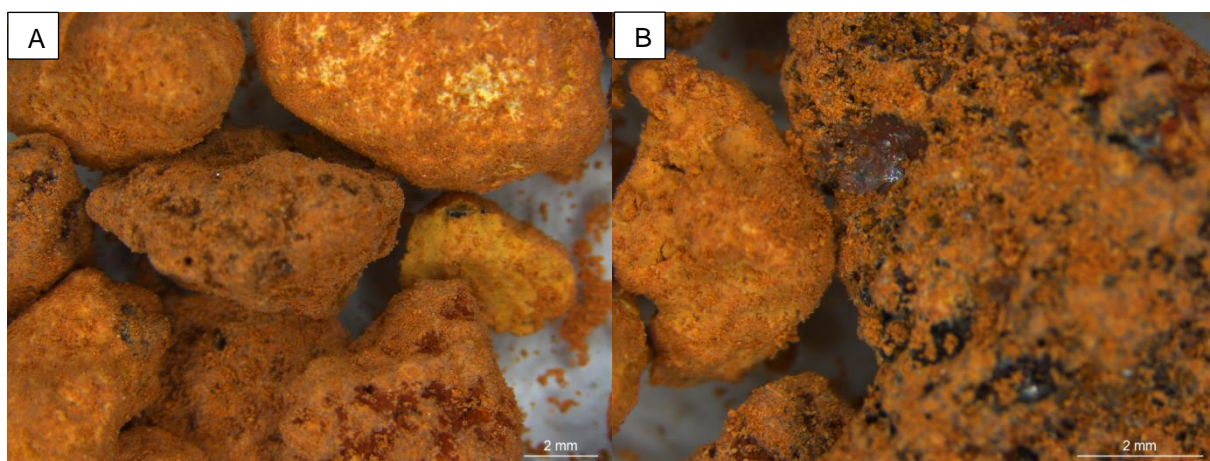


Figura 16 - Amostra de mão de bauxita do lote L3. Fragmentos angulosos com alteração amarelada a esbranquiçada (A); Fragmento com inclusões pretas avermelhadas (B)(Fonte: própria).



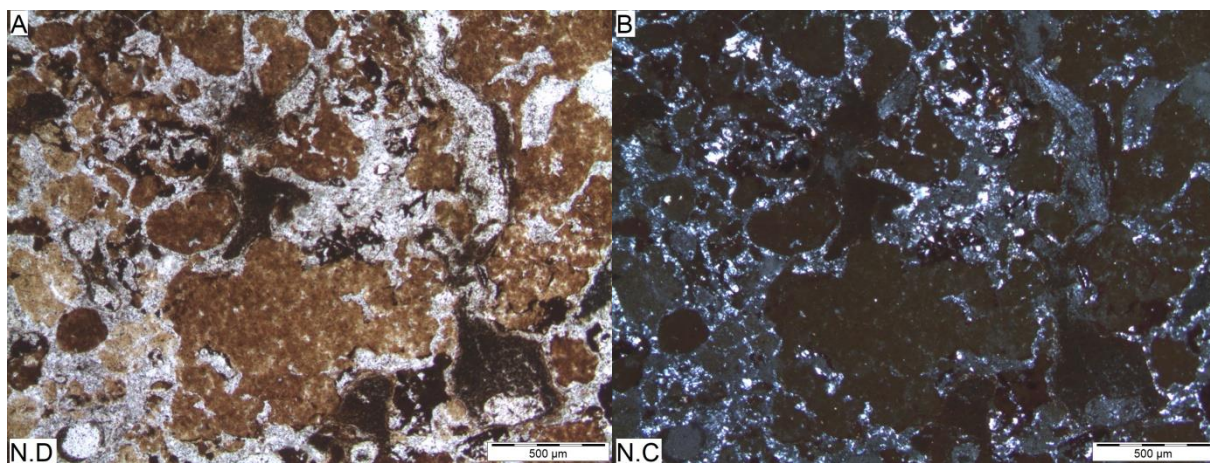


Figura 17 - Imagem em lâmina de um grão do lote L3 da bauxita. Observa-se matriz gibbsítica muito fina com poros e fissuras preenchidas principalmente por massas de alteração marrom clara, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).

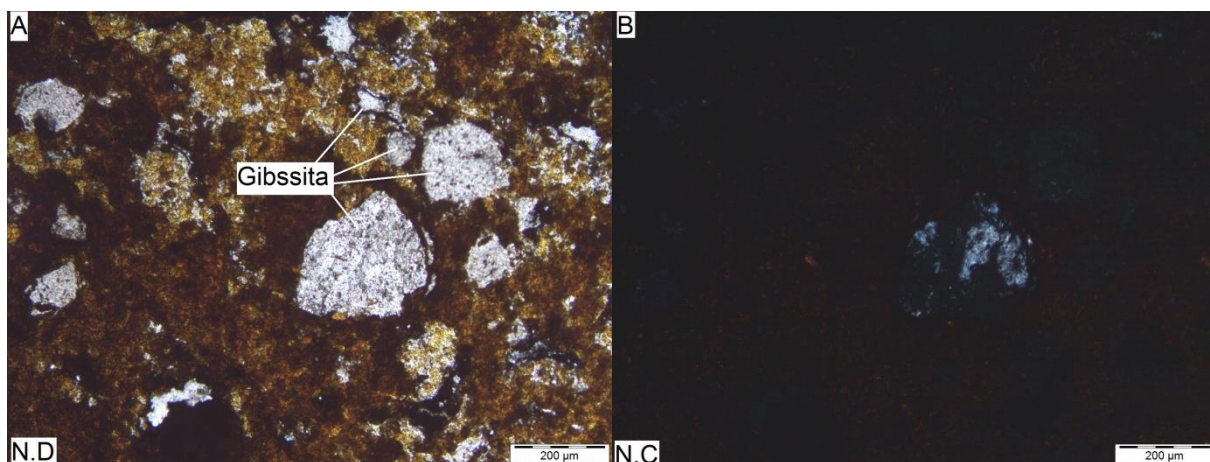


Figura 18 – Imagem em lâmina de um grão do lote L3 da bauxita. Observam-se preenchimentos de alteração de coloração marrom com inclusões de gibbsita mesocristalina, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).

Para a faixa granulométrica ‘-4,75 mm + 3,35 mm’ não há diferenças significativas das propriedades macroscópicas em relação à fração anterior (Figura 19). Em lâmina analisaram-se 50 grãos, em 44 grãos a textura predominante é de uma matriz alterada, de aspecto terroso, com menor presença de poros e fissuras (Figura 20), ambos preenchidos por gibbsita mesocristalina de tamanho de até 0,3 mm (Figura 21). Em seis grãos foram observadas as fissuras encurvadas e poros angulosos como os descritos para a faixa granulométrica ‘-12,7 mm + 6,35 mm’ apresentados na Figura 14.

Para a lâmina da faixa granulométrica ‘-6,35 mm + 4,75 mm’, estimou-se 65% de matriz alterada de aspecto terroso; 20% de gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) mesocristalina; 15% de minerais opacos.



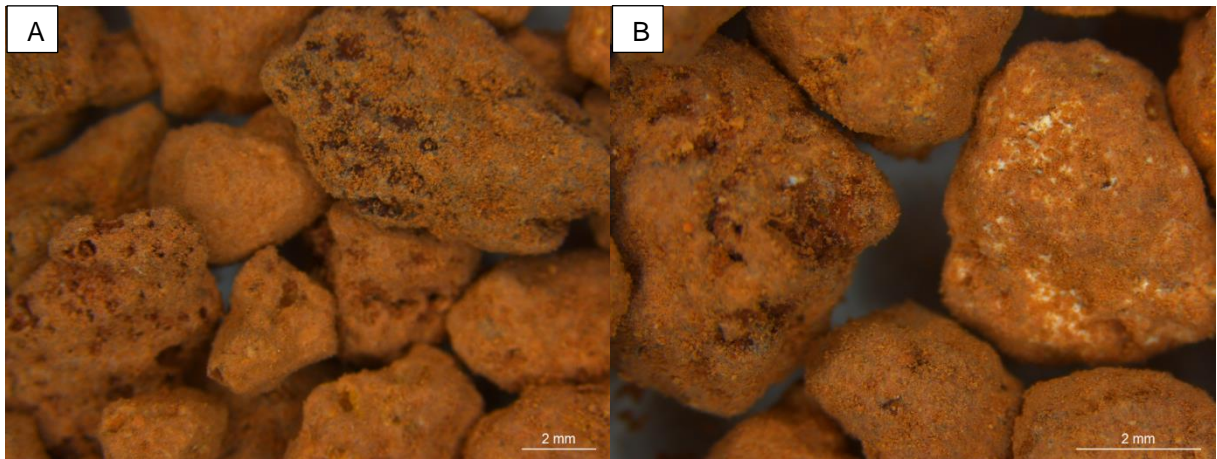


Figura 19 - Amostra de mão de bauxita do lote L4. Observam-se alguns fragmentos angulosos e outros sub-arredondados, com inclusões vermelhas (A) e esbranquiçadas (B) (Fonte: própria).

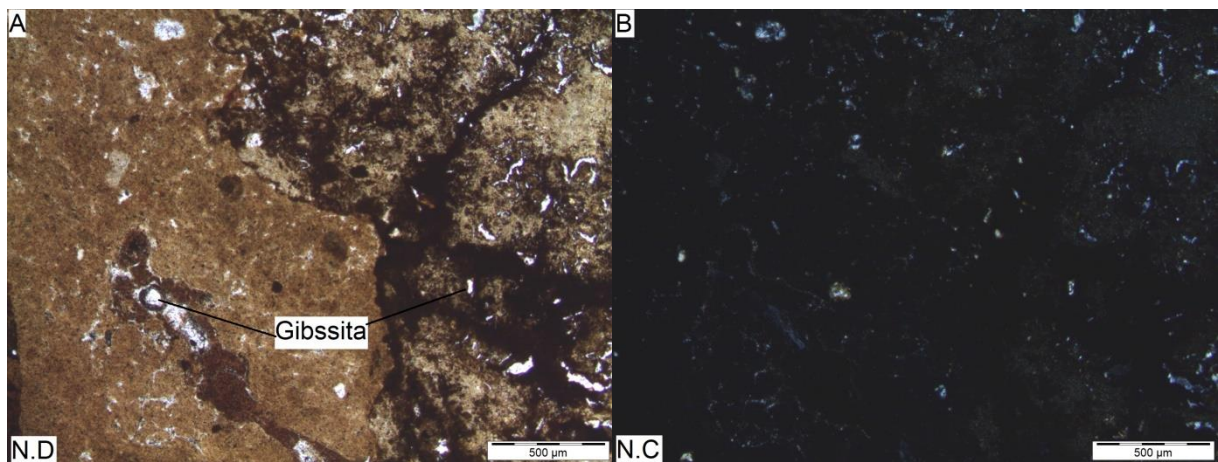


Figura 20 - Imagem em lâmina de um grão do lote L4 da bauxita. Observa-se matriz alterada, de aspecto terroso, com pouca presença de poros e fissuras, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).

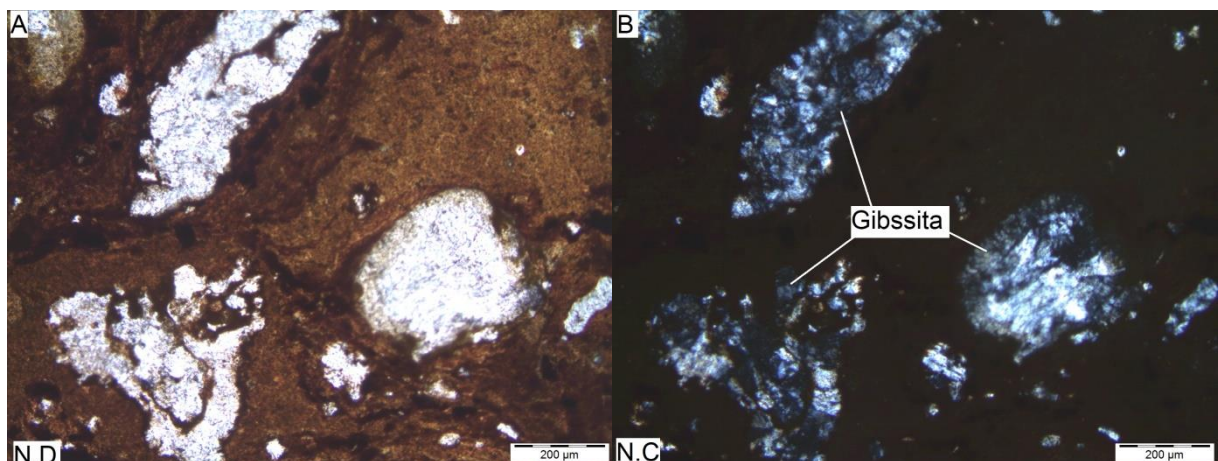


Figura 21 - Imagem em lâmina de um grão do lote L4 da bauxita. Observam-se poros preenchidos por gibssita mesocristalina na matriz alterada de aspecto terroso, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC)(B) (Fonte: própria).

### 5.1.2. Minério de Zinco

Para a maior faixa granulométrica '-25,4 mm + 12,7 mm' em amostras de mão foram observados fragmentos angulosos, de coloração predominantemente rosa acastanhado, e menos frequente, fragmentos de coloração cinza esverdeada. A estrutura predominante é maciça com finas venulações; alguns fragmentos apresentam bandas irregulares de cor rosa acastanhado, de até 1 cm, intercaladas com bandas de cor cinza (milimétrica) e bege, de até 1 cm. (Figura 22). Frequentemente observou-se o brilho vítreo da dolomita presente nos fragmentos. As feições macroscópicas são as mesmas para todas as frações granulométricas, variando apenas o tamanho do fragmento.

Na lâmina Z-12 foram observados quatro grãos, um grão essencialmente dolomítico, com dolomita fina, de textura granoblástica irregular, por vezes apresentam opacos em pequenos agregados irregulares, e veios de micrita dolomítica, grãos com essas feições são recorrentes nas demais faixas granulométricas.

Em três grãos observou-se que a willemita (o principal mineral de minério) ocorre sempre associada à dolomita (mineral de ganga) em duas formas, a primeira em bandas irregulares com espessura variando entre 0,5 mm a 1,0 mm, de textura granoblástica com contorno irregular dos cristais, e a segunda preenchendo veios com textura microgranular e espessura variando entre 0,07 mm e 0,4 mm. Nas bandas irregulares a willemita e a dolomita variam de 0,1 mm a 0,3 mm de tamanho. Nos veios ocorrem de tamanho < 0,02 mm a 0,1 mm (Figura 23). Observou-se ainda nesse grão, dolomita com tamanho de 4 mm e espessura de 2 mm, envolvida por opacos (Figura 24). Os minerais opacos ocorrem em aglomerados irregulares maciços, por vezes disseminados e com aspecto venular, observam-se cristais vermelhos, com aspecto granular prismático, nos contatos entre os opacos e os demais minerais, o que sugere que estes opacos sejam de hematita. Para o grupo de três grãos, estimou-se 30% de micrita (matriz com dolomita e willemita associadas); 25% de willemita fina ( $\text{Zn}_2(\text{SiO}_4)$ ); 20% de dolomita fina ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ); 20% de opacos e 5% de dolomita e willemita associadas em veio microgranular.



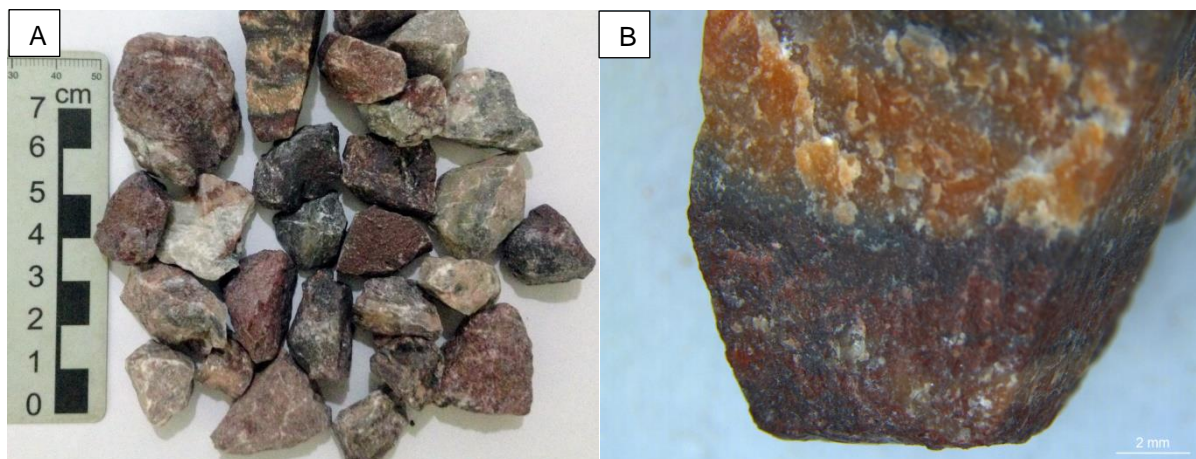


Figura 22 - Amostra de mão de minério de zinco do lote L1. Fragmentos angulosos, com coloração predominantemente rosa acastanhado e menos frequente cinza esverdeado (A); detalhe do bandamento observado em alguns fragmentos (B) (Fonte: própria).

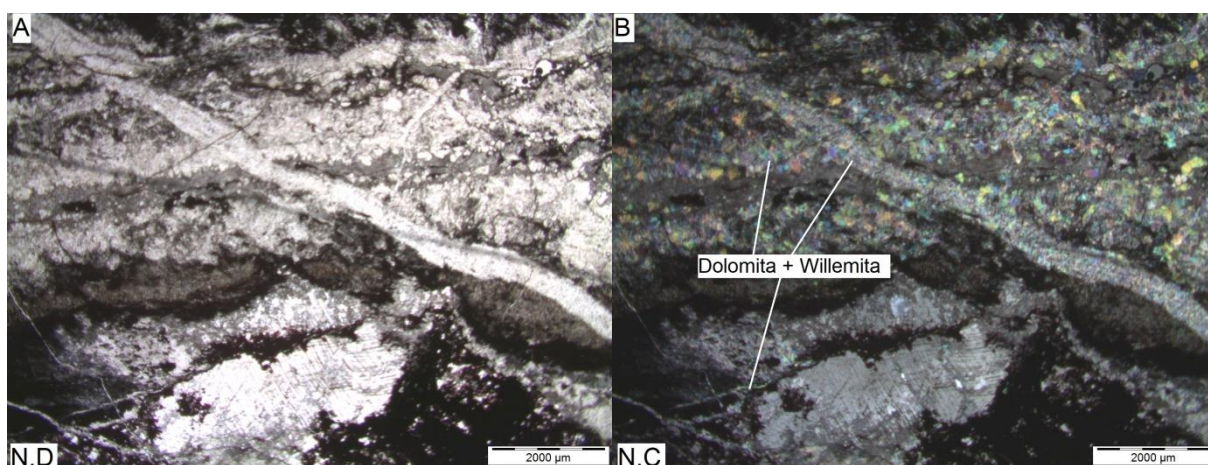


Figura 23 – Imagem em lâmina de um grão do lote L1 do minério de zinco. Observa-se dolomita e willemita com textura granoblástica em bandas irregulares, cortadas por veios de textura microgranular, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).

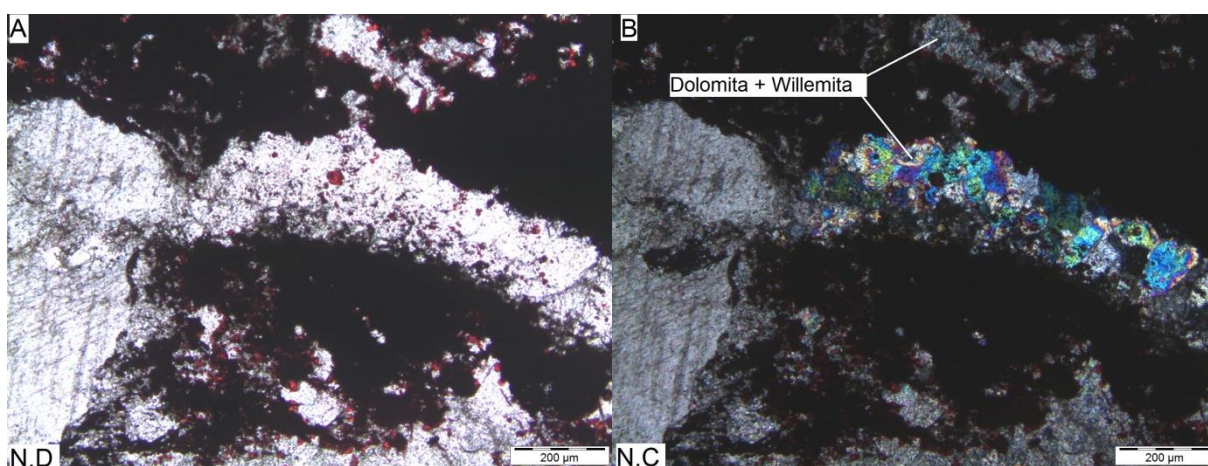


Figura 24 - Imagem em lâmina de um grão do lote L1 do minério de zinco. Observa-se dolomita envolvida por opacos (à esquerda), veio microgranular com dolomita e willemita associadas (à direita), sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria)

A Figura 25 apresenta as amostras de mão da faixa granulométrica '-12,7 mm + 6,35 mm'. Devido à diminuição de tamanho dos fragmentos nesta faixa granulométrica e nas seguintes, tem-se a impressão de que a estrutura predominante é maciça, porém não é possível fazer esta relação, uma vez que estes fragmentos podem ser provenientes de bandamentos centimétricos.

Em lâmina analisaram-se onze grãos, dois grãos essencialmente dolomíticos como o descrito para o lote L1, e em nove grãos observou-se que a willemita ocorre com hábito fibroso com textura fibro-radiada, e com substituições em seus limites de willemita de textura granoblástica e microgranular, envolvidas por uma matriz de micrita com inclusões irregulares de opacos (Figura 26). A willemita fibro-radiada ocorre com tamanho de raio variando entre 0,2 mm a 2,2 mm, enquanto que a willemita com textura granoblástica ocorre com tamanho variando entre 0,04 mm a 0,1 mm (Figura 27). Observaram-se massas irregulares de opacos preenchendo fissuras na matriz de micrita. Para o grupo de nove grãos, estimou-se 30% de micrita (matriz com dolomita e willemita associadas); 20% de willemita fibro-radiada ( $\text{Zn}_2(\text{SiO}_4)$ ); 15% de willemita fina ( $\text{Zn}_2(\text{SiO}_4)$ ); 10% de dolomita fina ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ); 25% de opacos.

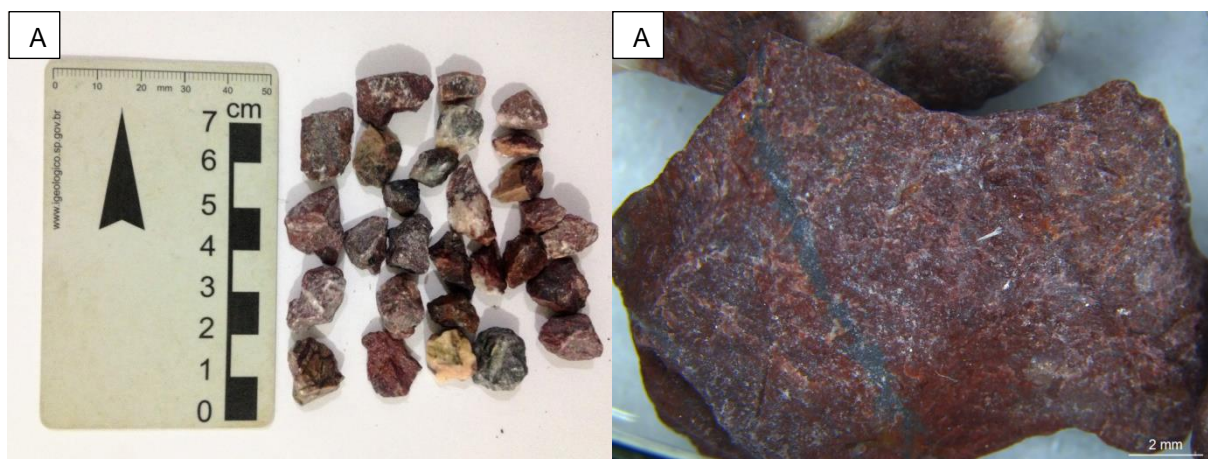


Figura 25 - Amostra de mão de minério de zinco do lote L2. Fragmentos angulosos, com coloração predominantemente rosa acastanhado e menos frequente cinza esverdeado (A); detalhe de um fragmento de cor castanho com venulações de cor mais clara, e veio de cor cinza escuro (B) (Fonte: própria)



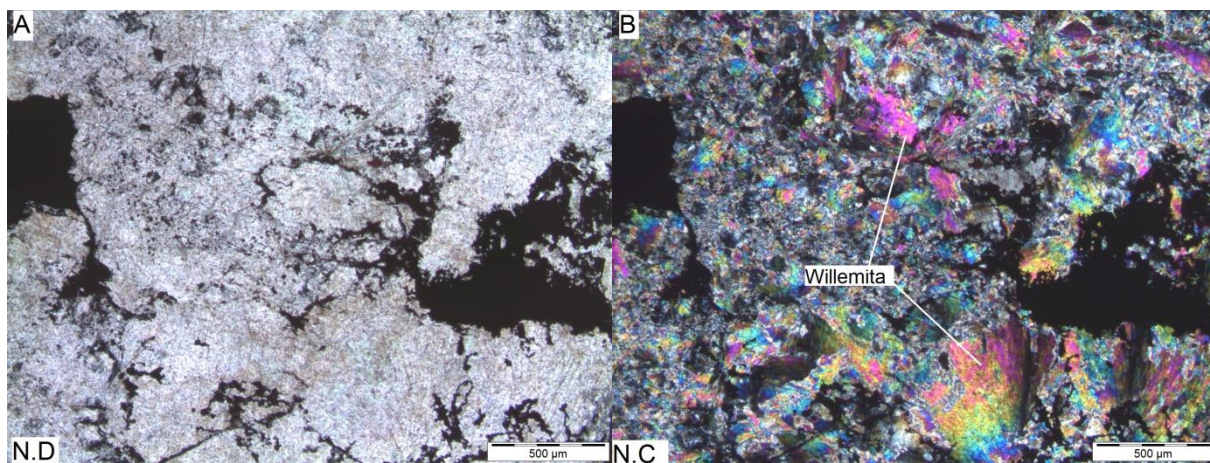


Figura 26 - Imagem em lâmina de um grão do lote L2 do minério de zinco. Observa-se matriz micrítica com inclusões irregulares de opacos, com willemita de textura fibro-radiada, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).

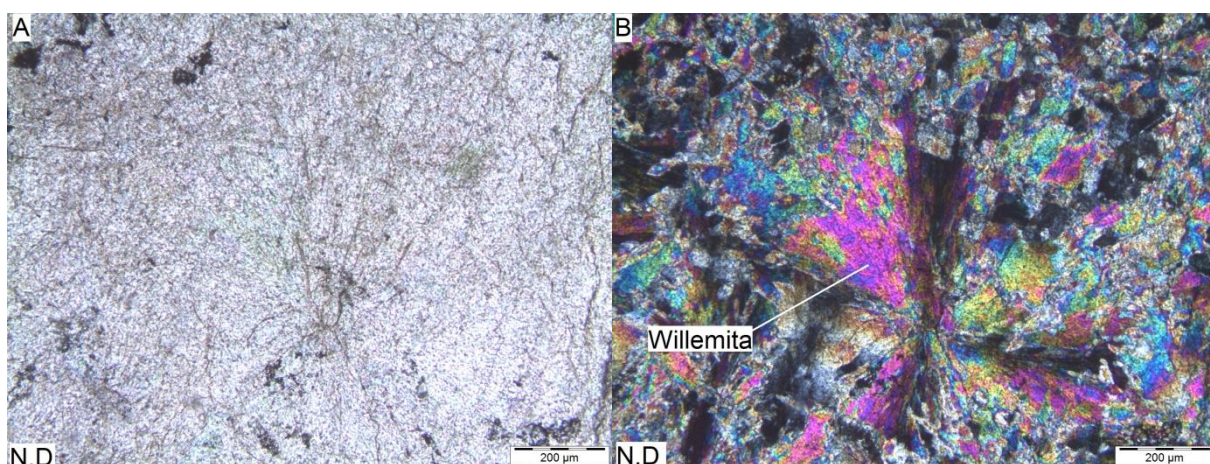


Figura 27 - Imagem em lâmina de um grão do lote L2 do minério de zinco. Observa-se willemita com textura fibro-radiada, com substituições em seus limites de willemita com textura granoblástica, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).

A Figura 28 apresenta as amostras de mão da faixa granulométrica '-6,35 mm + 4,75 mm'. Em lâmina analisaram-se 26 grãos, 18 grãos essencialmente dolomíticos como o descrito para o lote L1, e em oito grãos a textura predominante é de uma matriz de micrita essencialmente dolomítica, com presença secundária de opacos em agregados irregulares, com cristais sobrecrecidos prismáticos de willemita (Figura 29). Em algumas porções observa-se dolomita com tamanho variando entre 0,1 mm e 0,4 mm, com forma anedral com cristais de willemita em seus limites, em outras porções, tanto a matriz de micrita como a dolomita anedral, sobrecrecem consumindo a willemita. De uma forma geral a willemita ocorre predominantemente em cristais prismáticos hexagonais (Figura 30), com tamanho variando entre 0,1 mm e 0,2 mm, por vezes deformados. Para este grupo de oito grãos, estimou-se 30% de willemita fina ( $\text{Zn}_2(\text{SiO}_4)$ ); 25% de matriz de micrita (dolomítica); 25% de dolomita fina ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) e 20% de minerais opacos.





Figura 28 - Amostra de mão de minério de zinco do lote L3. Observam-se fragmentos angulosos com venulações deformadas (A); fragmentos de aspecto maciço de diferentes cores (B) (Fonte: própria).

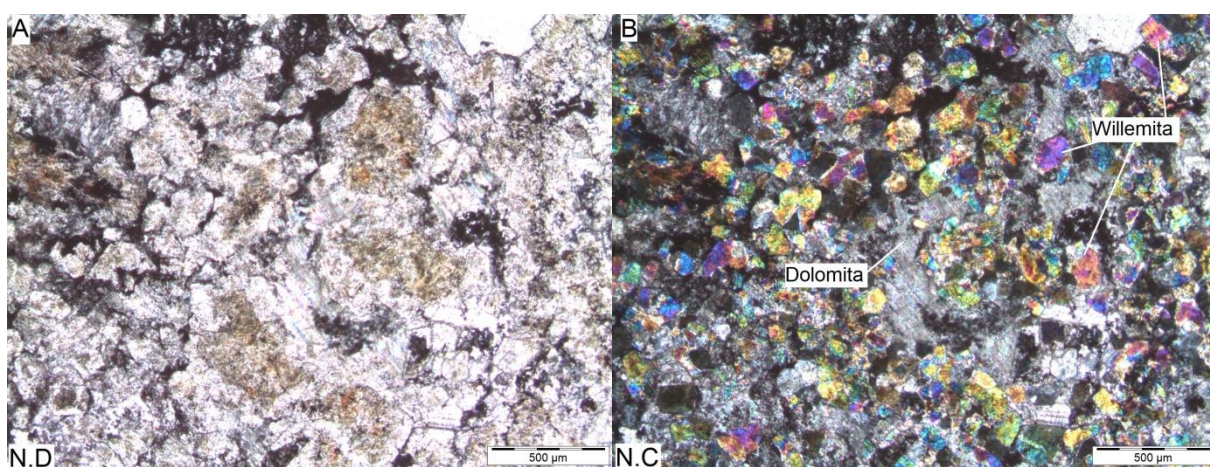


Figura 29 - Imagem em lâmina de um grão do lote L3 do minério de zinco. Observa-se matriz essencialmente dolomítica (micrítica), com presença secundária de opacos, com cristais sobrecrecidos prismáticos de willemita, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).

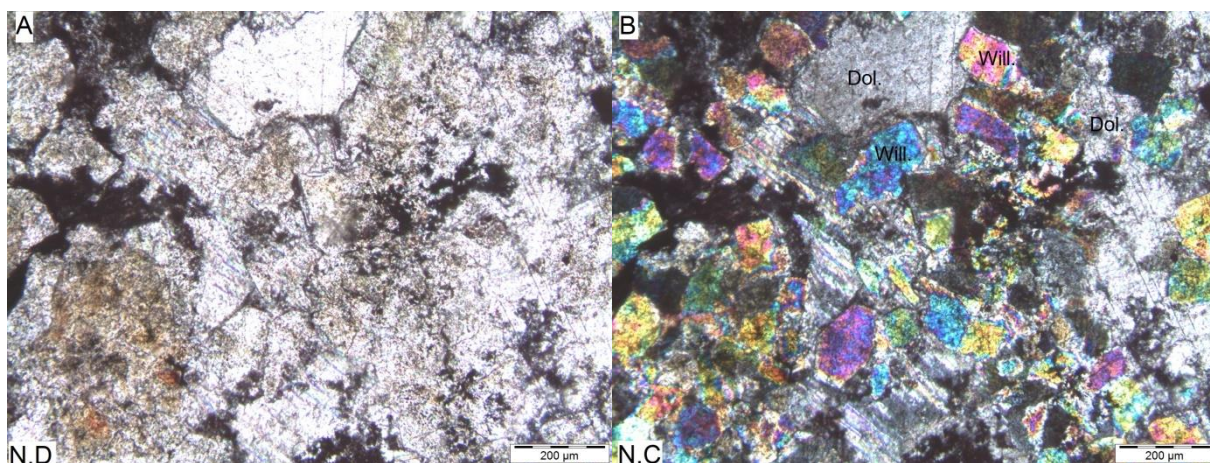


Figura 30 - Imagem em lâmina de um grão do lote L3 do minério de zinco. Observa-se willemita prismática deformada sobre dolomita anedral, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).



A Figura 31 apresenta as amostras de mão da faixa granulométrica '-4,75 mm + 3,35 mm'. Em lâmina analisaram-se 31 grãos, 30 grãos essencialmente dolomíticos como o descrito para o lote L1, e em apenas um grão foi observada a willemita. A willemita ocorre associada à dolomita, com textura granoblástica, hábito predominantemente subedral, e de forma subordinada em contatos polygonizados com alteração. Observou-se ainda veio de dolomita e willemita associadas com textura de micrita (Figura 32), e mais raramente calcita de formato irregular. Os minerais opacos ocorrem em aglomerados irregulares, maciços a levemente disseminados, por vezes com aspecto venular. Para o grão em que foi observado willemita, estimou-se 60% de willemita ( $\text{Zn}_2(\text{SiO}_4)$ ); 30% de dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ); 6% de minerais opacos e 4% de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ).



Figura 31 - Amostra de mão de minério de zinco do lote L4. Observam-se fragmentos angulosos, de diferentes cores e com venulações deformadas (Fonte: própria).

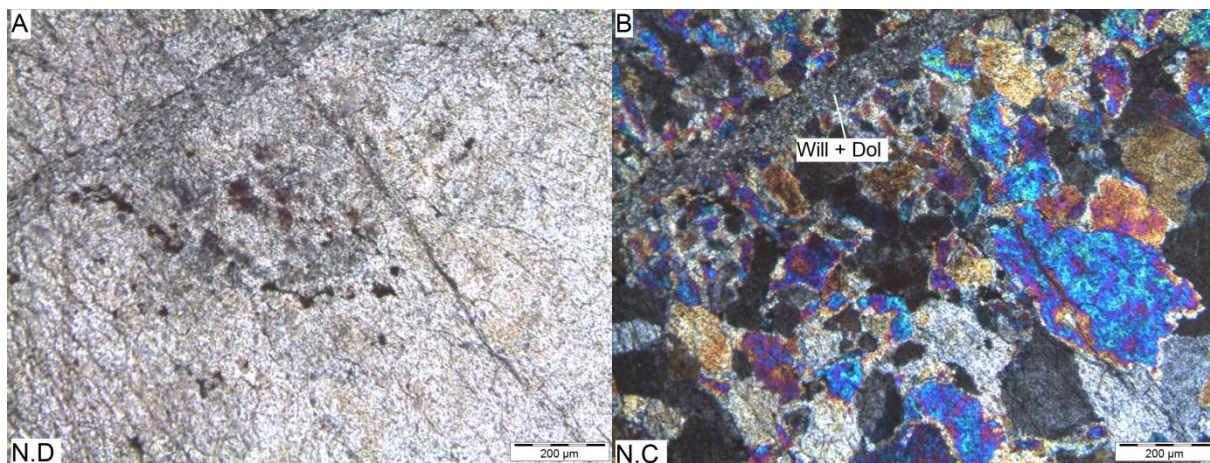


Figura 32 – Imagem em lâmina de um grão do lote L4 do minério de zinco. Observa-se no canto superior esquerdo willemita em contatos polygonizados e veio com textura micrítica, à direita observa-se willemita com hábito subedral, sob nicóis descruzados (ND) (A); idem sob nicóis cruzados (NC) (B) (Fonte: própria).

## 5.2. Teste de heterogeneidade

### 5.2.1. Malhas, Massas e Teores

A partir da realização dos testes de heterogeneidade foram obtidas as massas de 50 amostras de cada fração granulométrica, com um total de 200 amostras por minério, totalizando 400 amostras neste trabalho. Os dados de malhas e massas dos lotes dos dois minérios são apresentados de forma compilada na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação dos dados de malhas e massas obtidas nos testes de heterogeneidade para a bauxita e minério de zinco (Elaborada pela autora).

Bauxita								
Lote	Lado da Célula	Malha (nº de células)	Soma das massas das amostras (g)	Máximo massa (g)	Mínimo massa (g)	Média massa (g)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
L1 (-25,4 mm + 12,7 mm)	300mm	50	21206,0	730,0	238,0	424,1	105,42	0,25
L2 (-12,7 mm + 6,35 mm)	200mm	90	9206,0	258,0	104,0	184,1	29,11	0,16
L3 (-6,35 mm + 4,75 mm)	100mm	360	5410,0	132,0	94,0	108,2	7,71	0,07
L4 (-4,75 mm + 3,35 mm)	100mm	540	2542,0	60,0	42,0	50,8	4,77	0,09
Zinco								
Lote	Lado da Célula	Malha (nº de células)	Soma das massas das amostras (g)	Máximo massa (g)	Mínimo massa (g)	Média massa (g)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
L1 (-25,4 mm + 12,7 mm)	300mm	50	27631,6	794,3	349,8	552,6	107,85	0,20
L2 (-12,7 mm + 6,35 mm)	200mm	90	10612,2	256,8	177,3	212,2	16,05	0,08
L3 (-6,35 mm + 4,75 mm)	100mm	280	4768,7	112,4	81,0	95,4	8,50	0,09
L4 (-4,75 mm + 3,35 mm)	100mm	280	2221,5	53,3	37,4	44,4	3,61	0,08

Para os lotes L1 e L2, o tamanho das malhas realizadas, 50 e 90, respectivamente, foram iguais para os dois minérios, enquanto que para os lotes L3 e L4 os tamanhos das malhas para o minério de zinco (280 células) foi menor do que para o minério de alumínio (bauxita). Isto se deve ao fato de a quantidade de fragmentos obtidos para estas frações granulométricas, após o peneiramento, ter sido menor do que a quantidade adquirida para a bauxita, entretanto, as somatórias das massas adquiridas nestas frações granulométricas foram semelhantes para os dois minérios.

Para o lote L4, da bauxita, foi realizada uma malha maior do que a realizada para o zinco, devido ao fato de a bauxita possuir a menor densidade dentre os dois. Foi necessário realizar uma malha de 540 células (resultando em uma amostra de 540 fragmentos) para obter uma massa superior à mínima requerida para preparação e análise química (30 g).

Os dados dos teores obtidos dos lotes dos dois minérios são apresentados de forma compilada na Tabela 5. Para a bauxita foram obtidos os teores de alumina aproveitável e

sílica reativa, visto que a sílica reativa é um contaminante importante no valor do produto, pois prejudica os processos subsequentes para a obtenção de alumínio.

Tabela 5 - Comparação dos teores obtidos nos testes de heterogeneidade para a bauxita e minério de zinco  
(Elaborada pela autora).

<b>Bauxita</b>					
Teor de Alumina					
Lote	Teor Máximo (%)	Teor Mínimo (%)	Teor Médio* (%)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
L1 (-25,4 mm + 12,7 mm)	60,14	52,11	57,24	1,62	0,03
L2 ( -12,7 mm + 6,35 mm)	58,28	50,59	54,49	1,55	0,03
L3 (-6,35 mm + 4,75 mm)	56,13	51,03	53,69	1,10	0,02
L4 (-4,75 mm + 3,35 mm)	56,00	51,61	53,20	1,06	0,02
Teor de Sílica					
Lote	Teor Máximo (%)	Teor Mínimo (%)	Teor Médio* (%)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
L1 (-25,4 mm + 12,7 mm)	4,47	2,74	3,36	0,34	0,10
L2 ( -12,7 mm + 6,35 mm)	4,77	3,52	4,00	0,27	0,07
L3 (-6,35 mm + 4,75 mm)	4,98	3,76	4,32	0,27	0,06
L4 (-4,75 mm + 3,35 mm)	5,15	3,95	4,40	0,29	0,07
<b>Zinco</b>					
Lote	Teor Máximo (%)	Teor Mínimo (%)	Teor Médio* (%)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
L1 (-25,4 mm + 12,7 mm)	12,82	2,12	8,07	2,52	0,31
L2 ( -12,7 mm + 6,35 mm)	14,03	4,30	8,19	2,45	0,30
L3 (-6,35 mm + 4,75 mm)	10,75	4,82	7,62	1,11	0,15
L4 (-4,75 mm + 3,35 mm)	8,12	4,58	6,14	0,96	0,16

Os teores médios apresentados na Tabela 5 correspondem à média ponderada dos teores pelas massas, explicada no item 3.3.1 e representada a seguir:

$$a_l = \frac{1}{M_L} \sum a_i \times M_s$$

Sendo  $a_i$  (teor da amostra),  $M_s$  (massa da amostra) e  $M_L$  (massa do lote), estes dados constam nos Anexos 1, 2 e 3.

Para a bauxita, o teor de alumina variou entre 50,59% (L2) e 60,14% (L1); o maior teor médio foi observado para o lote L1 com 57,24% e o menor para o lote L4 com 53,20%. O teor de sílica variou entre 2,74% (L1) e 5,15% (L4); o maior teor médio observado foi para o lote L4 com 4,40%.

Para o minério de zinco, o teor variou entre 2,12% (L1) e 14,03% (L2); o maior teor médio observado foi para o lote L2 com 8,19% e o menor para o lote L4 com 6,14%.

Os dados de massa e teor por amostra são apresentados no Anexo 3.

#### 5.2.2. Fórmula de Gy (não calibrada)

Para calcular a fórmula de Gy (não calibrada), primeiro calculou-se o fator mineralogia “c”. A Tabela 6 apresenta os valores utilizados para cálculo de “c” da alumina, sílica e zinco. Os resultados foram obtidos através da fórmula explicada no item 3.3.1 e representada a seguir:

$$c = \gamma_M \frac{(1 - a_L)^2}{a_L} + \gamma_{g(1-a_L)}$$

Tabela 6 - Parâmetros utilizados para o cálculo de c (Elaborada pela autora).

Parâmetros para o cálculo de c	Alumina	Sílica	Zinco
Densidade do mineral de interesse $\gamma_m$	3,98g/cm <sup>3</sup>	2,66g/cm <sup>3</sup>	4,00g/cm <sup>3</sup> (willemite)
Densidade média dos minerais de ganga $\gamma_g$	2,66g/cm <sup>3</sup> (sílica)	3,98g/cm <sup>3</sup> (alumina)	3,43g/cm <sup>3</sup> *
Teor do mineral de interesse no lote, em decimal $a_l$	0,53	0,04	0,06
Resultado	2,88	64,94	62,13

\*3,43g/cm<sup>3</sup> = densidade média de ganga estimada através das porcentagens descritas por Monteiro (2002) dos minerais de ganga do depósito e suas densidades reais. Os dados de densidade da alumina, sílica e willemite foram fornecidos pelas respectivas empresas.

Obtidos os valores de “c”, procedeu-se com o cálculo da fórmula não calibrada de Gy, através da fórmula explicada no item 5.3.1 e representada a seguir:

$$s^2_{FSE} = c f g l d^3 \left( \frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right)$$

Para a alumina, sílica e zinco foram utilizados os mesmos valores de:

- $f$  (fator forma),  $f = 0,5$ ;

- $g$  (fator granulometria),  $g = 0,55$ , (materiais resultantes do peneiramento entre duas malhas);

O fator de liberação  $l = 0,20$  para alumina e sílica (materiais medianos); e  $l = 0,40$  para o zinco (materiais heterogêneos).

Os resultados obtidos para a fórmula não calibrada são apresentados em função de  $d$  (o tamanho máximo dos fragmentos),  $M_s$  (massa da amostra) e  $M_L$  (massa do lote). Nas fórmulas a seguir,  $K$  é dado pelo valor que multiplica “ $d$ ” e  $\alpha$  é sempre igual a 3 (expoente de  $d$ ).

Sendo então a fórmula de Gy:

Para a alumina:

$$s^2_{\text{FSE}} = 0,158d^3 \left( \frac{1}{M_s} - \frac{1}{M_L} \right)$$

Para a sílica:

$$s^2_{\text{FSE}} = 3,571d^3 \left( \frac{1}{M_s} - \frac{1}{M_L} \right)$$

Para o zinco:

$$s^2_{\text{FSE}} = 6,834d^3 \left( \frac{1}{M_s} - \frac{1}{M_L} \right)$$

### 5.2.3. Fórmula de Gy (calibrada)

Para obter a fórmula calibrada de Gy foram seguidos os procedimentos descritos no item 3.3.2. Com os resultados de massa e análise química de cada uma das 400 amostras pôde-se, para cada uma das frações granulométricas analisadas, estimar o valor do fator constante de heterogeneidade constitucional ou heterogeneidade intrínseca do lote ( $IH_L$ ), através da fórmula explicada no item 3.3.2 e representada a seguir:

$$\text{EST } IH_L = g \sum_i \frac{(a_i - a_L)^2}{a_L^2} \frac{M_s^2}{M_L}$$

Para o fator granulométrico “ $g$ ” foi utilizado 0,55, para todas as frações granulométricas, de acordo com o item 3.3.1, visto que todas as amostras foram peneiradas entre duas malhas. Os valores de  $a_i$  (teor da amostra),  $a_L$  (teor médio do lote),  $M_s$  (massa da amostra) e  $M_L$  (massa do lote) estão nos Anexos 1, 2 e 3. Os resultados obtidos de  $IH_L$  por lote para a análise de alumina, sílica e zinco estão na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores obtidos do fator de heterogeneidade constitucional (IHL) por lote dos minérios de alumínio e zinco (Elaborada pela autora).

<b>Resultados EST IHL</b>			
Lote	Alumina	Sílica	Zinco
L1 (-25,4 mm + 12,7 mm)	0,202	3,329	33,625
L2 ( -12,7 mm + 6,35 mm)	0,083	0,444	10,025
L3 (-6,35 mm + 4,75 mm)	0,025	0,234	1,184
L4 (-4,75 mm + 3,35 mm)	0,010	0,134	0,623

Para obter o diâmetro nominal ( $d_n$ ), utilizou-se a fórmula:

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{d_1^3 + d_2^3}{2}}$$

Sendo  $d_1$  e  $d_2$  as aberturas das malhas utilizadas no peneiramento (superior e inferior), em centímetro. Como as aberturas das malhas foram as mesmas para os dois minérios, os valores de  $d_n$  obtidos são iguais para os dois minérios estudados. Na Tabela 8. estão os valores de  $d_n$  obtidos por lote.

Tabela 8 - Valores obtidos de  $d_n$  por lote (Elaborada pela autora).

<b>Lote</b>	<b>Diâmetro (cm)</b>		
	$d_1$	$d_2$	$d_n$
L1 (-25,4 mm + 12,7 mm)	2,54	1,27	2,097
L2 ( -12,7 mm + 6,35 mm)	1,27	0,635	1,048
L3 (-6,35 mm + 4,75 mm)	0,635	0,475	0,566
L4 (-4,75 mm + 3,35 mm)	0,475	0,335	0,417

Os dados de  $d_n$  e de  $IHL_L$  foram plotados em um gráfico di-log, no qual o eixo das abscissas é referente ao diâmetro nominal ( $d_n$ ), e o eixo das ordenadas, a estimativa do  $IHL_L$ . A partir da linha de tendência de potência dos 4 pontos em cada gráfico, foram estimadas as constantes de amostragem K e  $\alpha$ .

A correlação entre  $IHL_L$  e o diâmetro do fragmento, obtida para a alumina está apresentada na Figura 33.



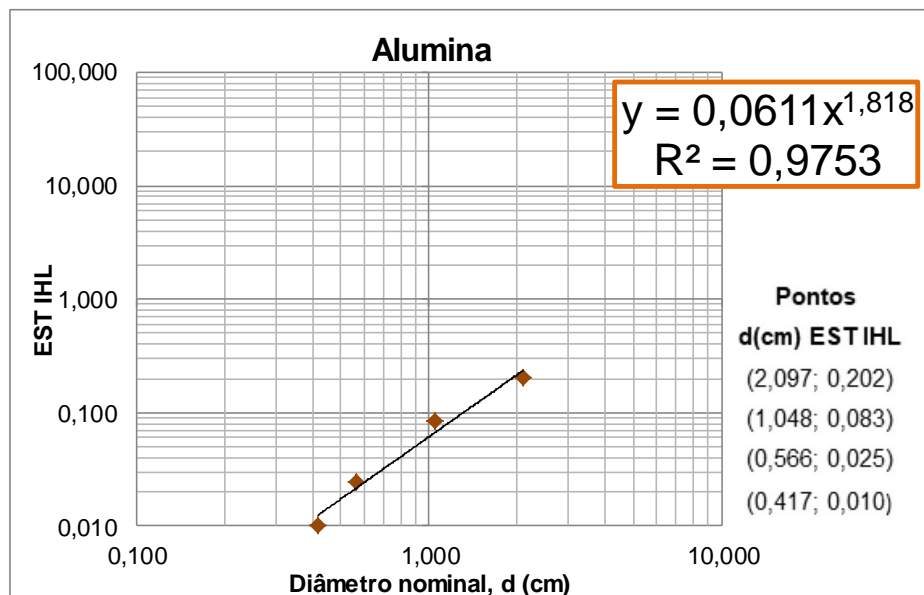


Figura 33 - Correlação entre  $IHL_L$  e o diâmetro do fragmento – alumina aproveitável (Elaborada pela autora).

Através da equação de reta fornecida pela linha potencial de tendência do gráfico, obtêm-se:  $K=0,0611$  e  $\alpha=1,818$ .

Sendo, então, a fórmula calibrada de Gy, para alumina aproveitável:

$$s^2_{FSE} = 0,0611d^{1,818} \left( \frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right)$$

A correlação obtida entre  $IHL_L$  e o diâmetro do fragmento para a sílica está apresentada na Figura 34.

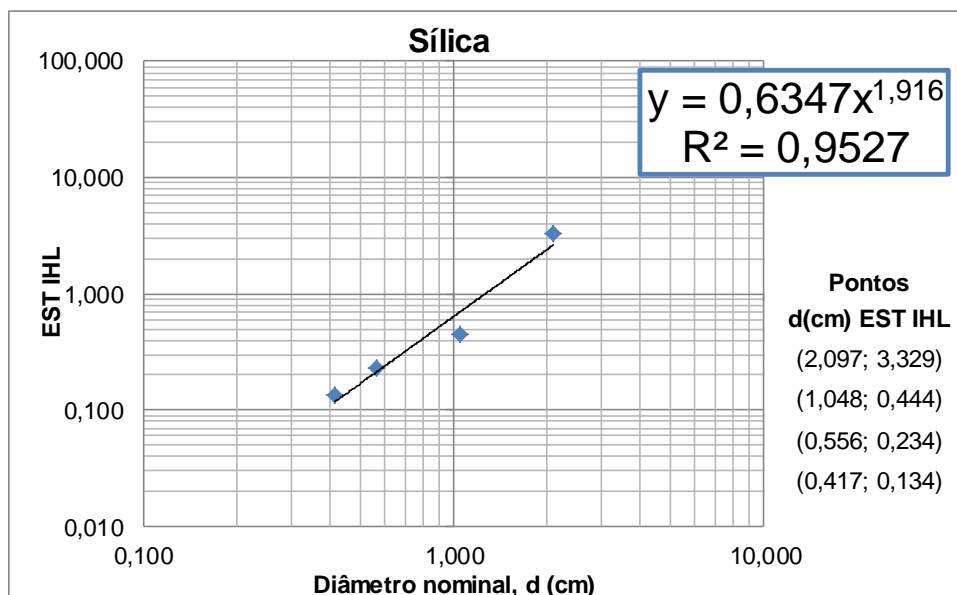


Figura 34 - Correlação entre  $IHL_L$  e o diâmetro do fragmento – sílica reativa (Elaborada pela autora).

Através da equação de reta fornecida pela linha potencial de tendência do gráfico, obtêm-se:  $K=0,06347$  e  $\alpha=1,916$ .

Sendo, então, a fórmula calibrada de Gy para sílica reativa:

$$s^2_{\text{FSE}} = 0,06347d^{1,916} \left( \frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right)$$

A correlação obtida entre  $IHL_L$  e o diâmetro do fragmento para o zinco está apresentada na figura 35.

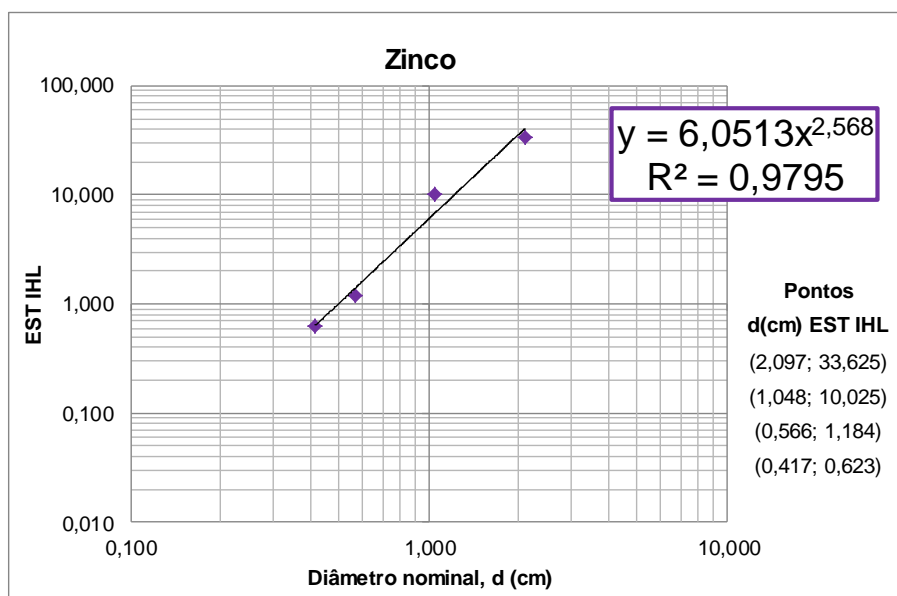


Figura 35 - Correlação entre  $IHL_L$  e o diâmetro do fragmento – zinco (Elaborada pela autora).

Através da equação de reta fornecida pela linha potencial de tendência do gráfico, obtêm-se:  $K=6,0513$  e  $\alpha=2,568$ .

Sendo, então, a fórmula calibrada de Gy para o zinco:

$$s^2_{\text{FSE}} = 6,0513d^{2,568} \left( \frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right)$$

## 6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 6.1. Heterogeneidade de constituição

A descrição das amostras de mão e o método de microscopia óptica mostraram-se limitados. Para a caracterização da mineralogia das faixas granulométricas, seriam necessárias mais lâminas por faixa, para uma análise quantitativa e representativa, além de métodos de alta resolução para identificar todas as fases minerais, com maior precisão.

Porém foi possível obter uma indicação da heterogeneidade de constituição dos minérios, além de relacionar o que foi visto em lâmina com o comportamento dos teores médios obtidos por lote. De uma forma geral, quanto menor a granulometria, menor a

quantidade de minerais de minério observadas em lâmina, tanto no caso da bauxita quanto no do zinco.

#### 6.1.1. *Bauxita*

Para o minério de alumínio, não foi possível identificar quais minerais compõem a alteração de cor marrom impregnada à matriz, e nem os minerais opacos observados. A coloração da alteração sugere a presença de ferro, e a sua textura, a presença de caulinita. Os minerais opacos podem ser relacionados com a presença de hematita no perfil; essas relações estariam em concordância com a descrição de Carvalho (1989) para o perfil do depósito.

Na fração '-6,35 mm + 4,75 mm' observa-se a matriz gibbsítica mais fina, com poros preenchidos pela alteração de cor marrom, ou seja, uma inversão do observado nas frações anteriores. Essa feição poderia ser relacionada às zonas escuras ricas em ferro descritas por Carvalho (1989). A fração mais fina apresenta uma matriz menos porosa e mais alterada, com pouca gibbsita mesocristalina, o que pode ser associado com o menor teor médio de alumínio observado nos lotes.

Para fazer uma relação direta da variação do teor de alumina e sílica obtidas para os lotes com a variação descrita no horizonte de alteração, seria necessária a orientação das amostras no momento da coleta, porém é possível relacionar as diferentes feições observadas como amostras provenientes de zonas diferentes do horizonte de alteração. Estas diferenças de composição refletem em associações diferentes de fragmentos, sendo a fração mais fina, a que concentra os argilominerais (caulinita), e por consequência o maior teor médio de sílica, como confirmado pela Tabela 5.

#### 6.1.2. *Zinco*

Para o minério de zinco, de uma forma geral observou-se que em todas as frações granulométricas a willemita ocorre associada à dolomita, variando o hábito e a textura, e que quanto menor a fração granulométrica, menor a quantidade de willemita observada, o que é coerente com o comportamento do teor médio nos lotes, em que o menor teor médio foi obtido na menor fração granulométrica, que concentra a maior quantidade de grãos essencialmente dolomíticos. A Tabela 5 confirma a diminuição do teor de zinco nas frações mais finas.

Os minerais opacos ocorrem em inclusões na matriz de micrita, e frequentemente envolvem cristais de dolomita anedral. Em seus limites possui uma coloração mais avermelhada, o que sugere presença de hematita, um dos principais minerais de ganga do depósito.

Quanto ao hábito dos cristais de willemita observou-se que predomina o hábito anedral em todas as frações granulométricas, o hábito prismático está mais presente na fração granulométrica '-6,35 mm + 4,75 mm', com frequente textura de substituição para willemita e dolomita, ambas com hábito anedral, e com alteração nas bordas em contato com outros cristais de willemita e dolomita. A willemita fibrosa foi observada somente na fração granulométrica "-12,7 mm + 6,35 mm" e ocorre com substituições em seus limites para willemita e dolomita, ambas com hábito anedral, envolvida em uma matriz de micrita composta essencialmente por dolomita e de forma subordinada willemita.

A textura granoblástica é predominante em todas as faixas granulométricas e indica condições de reequilíbrio do sistema. A textura fibro-radiada indica preenchimento não tardio, enquanto que a textura de micrita das fissuras e veios indica um preenchimento tardio.

Em análise conjunta das feições observadas, pode-se verificar o registro da complexidade da gênese do depósito, com eventos de metamorfismo, deformação e alteração hidrotermal.

## **6.2. Teste de Heterogeneidade**

Considerando-se as massas das amostras obtidas nos testes de heterogeneidade observa-se que o desvio padrão aumenta com o aumento da fração granulométrica. Isto é coerente com os intervalos de tamanho dentro de cada faixa granulométrica. O menor desvio padrão é observado no lote L4, que possui o menor intervalo de tamanho, ou seja, o menor fragmento nesta faixa é de 3,36 mm, enquanto o maior é de 4,75 mm, resultando em uma diferença de tamanho entre a maior e a menor malha de apenas 1,39 mm. No lote L1, no qual é observado o maior desvio padrão, o maior fragmento é de 25,4 mm, aproximadamente duas vezes maior do que o menor fragmento (12,7 mm), resultando em uma maior dispersão dos dados de massa obtidas para esta faixa.

Quanto aos teores obtidos, observa-se que para o minério de alumínio, o lote L1 apresentou o maior teor médio de alumina observado (57,24%) e o menor teor médio de sílica (3,36%); já o lote L4 apresentou o menor teor médio de alumina (53,20%) e o maior teor médio de sílica (4,40%). Dessa forma, com a diminuição da granulometria dos fragmentos, o teor de alumina diminui e o teor de sílica aumenta, o que é coerente com o fato de a sílica se concentrar nas frações mais finas. As figuras 36 e 37 apresentam, respectivamente, o comportamento do teor médio de alumina e de sílica para cada lote.

Para os teores médios obtidos por lote para o minério de zinco, o maior teor médio observado foi para o lote L2 com 8,19%, e o menor para o lote L4 com 6,14%, como observado na figura 38. O comportamento do teor médio por lote, mostra que o mineral de minério se concentra nas duas maiores faixas granulométricas.

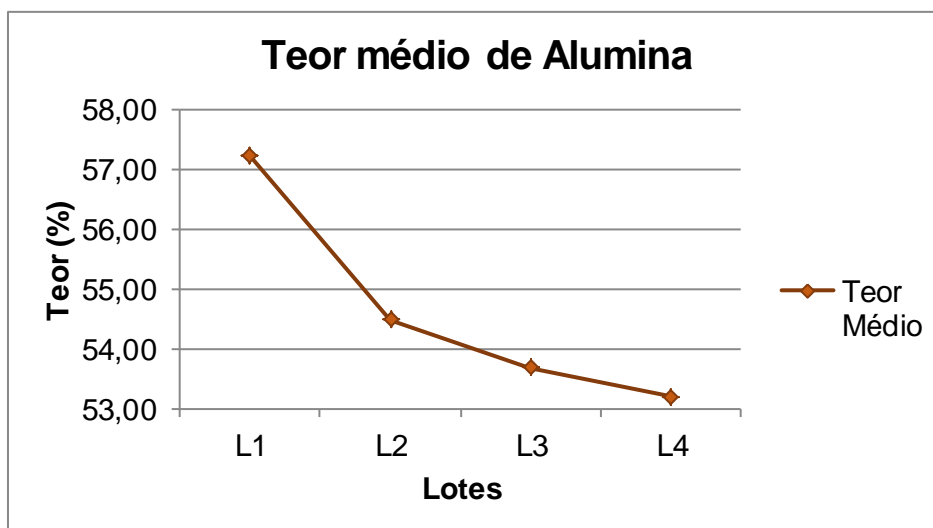


Figura 36 - Teor médio de Alumina obtido nos lotes (Elaborada pela autora).

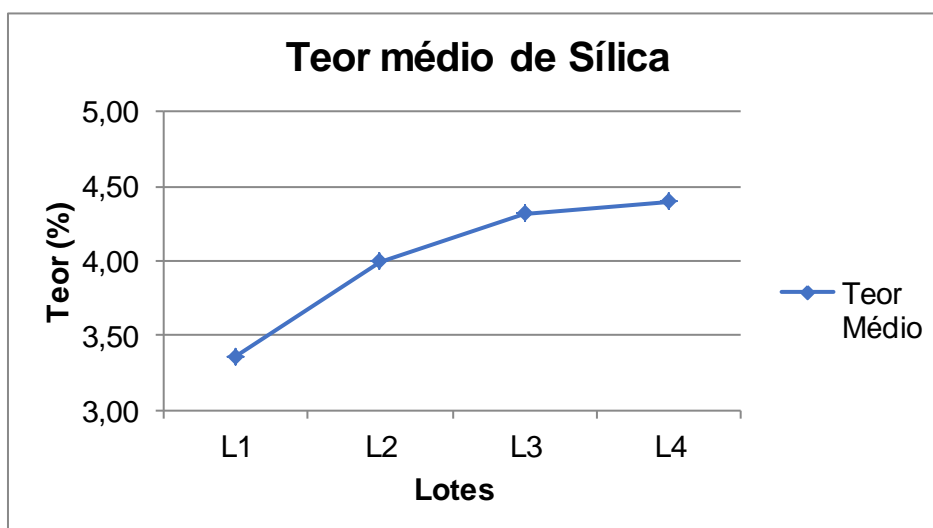


Figura 37 - Teor médio de Sílica obtido nos lotes (Elaborada pela autora).

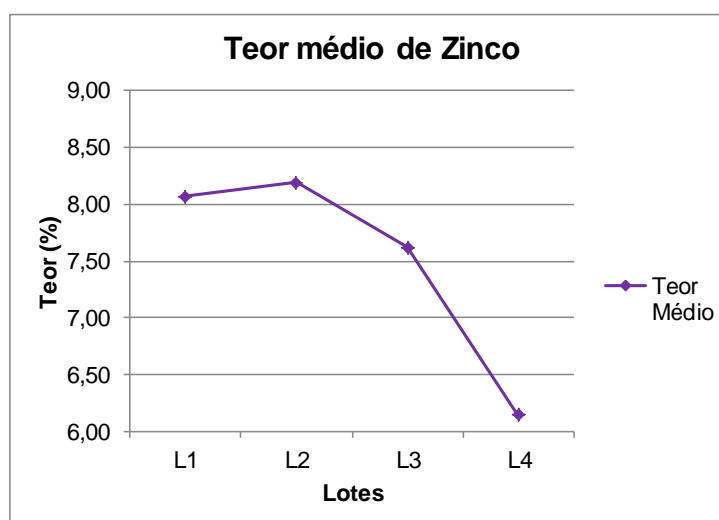


Figura 38 - Teor médio de Zinco obtido nos lotes (Elaborada pela autora).

O teor médio de zinco nos lotes varia mais que o teor de alumina, com coeficiente de variação em um intervalo de 0,15 a 0,31, enquanto o coeficiente de variação do teor de alumina varia entre 0,02 e 0,03. As diferenças de valor e intervalo para o coeficiente de variação do teor eram esperadas, pelo fato de o minério de zinco ter maior variabilidade natural em relação ao minério de alumínio. A Figura 39 apresenta a relação dos teores médios e os coeficientes de variação, e a Figura 40 apresenta a relação dos teores médios e as constantes K e  $\alpha$ .

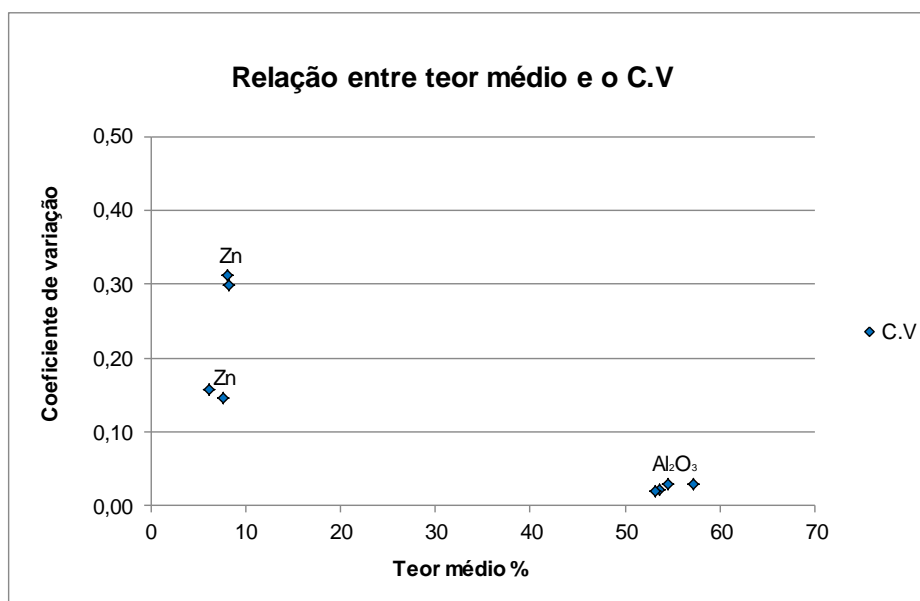


Figura 39 - Relação dos teores médios com os coeficientes de variação obtidos para os lotes dos minérios de alumínio e zinco (Elaborada pela autora).

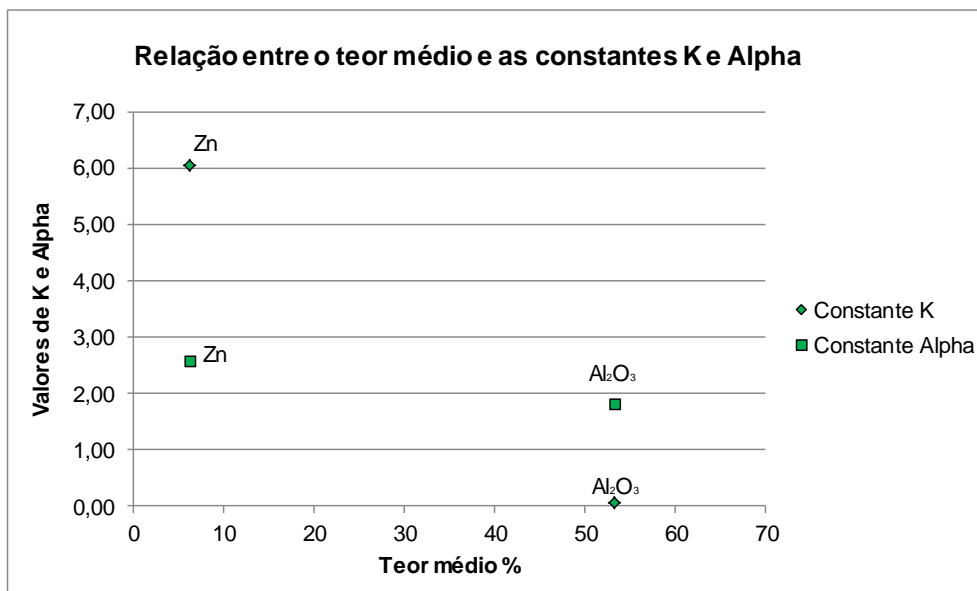


Figura 40 - Relação dos teores médios e as constantes K e Alpha obtidas pelo teste de heterogeneidade, foram utilizados os menores teores médios entre os quatro lotes, 6,14% para o Zn, e 53,20% para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. (Elaborada pela autora)

A relação observada na Figura 39 é de que o zinco possui os menores teores médios e os maiores coeficientes de variação, enquanto o minério de alumínio possui os maiores teores médios e os menores coeficientes de variação. Como apresentado na bibliografia, essa relação é esperada para minérios de média e de baixa variabilidade, respectivamente.

Em relação às constantes  $K$  e  $\alpha$  obtidas pelo teste de heterogeneidade, conforme o esperado, observou-se que para o minério de alumínio foram obtidas constantes com valores menores do que para o minério de zinco, e, por consequência, uma menor variância relativa do erro fundamental de amostragem. Este resultado confirma a relação da variabilidade natural do minério com a heterogeneidade intrínseca, sendo o alumínio um minério de baixa variabilidade natural com menor heterogeneidade intrínseca, e o minério de zinco um minério de maior variabilidade natural e maior heterogeneidade intrínseca.

O valor obtido para a constante  $K$ , conforme discutido na revisão bibliográfica substitui o resultado da multiplicação dos fatores  $c$ ,  $f$ ,  $g$  e  $l$  da fórmula não calibrada de Gy, enquanto o valor obtido para a constante  $\alpha$  substitui o expoente 3 do diâmetro da fórmula não calibrada de Gy. As diferenças entre os valores obtidos por meio da multiplicação dos fatores da fórmula não calibrada de Gy e a constante  $K$  são observadas na Figura 41, assim como a diferença do expoente do diâmetro.

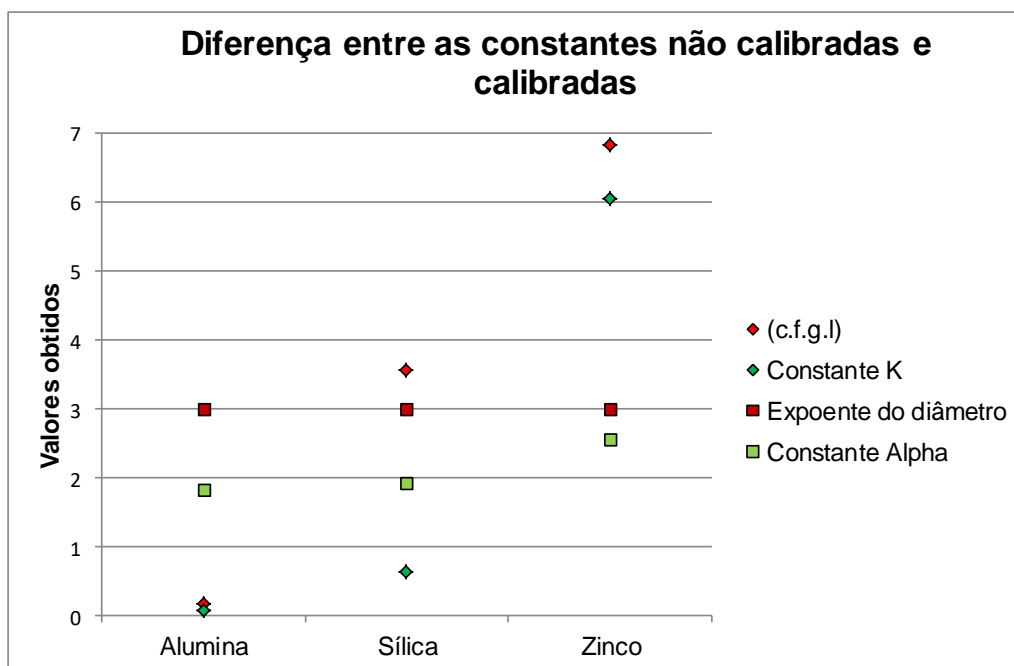


Figura 41 - Diferença entre os valores obtidos para as constantes da fórmula calibrada de Gy e as constantes da fórmula não calibrada, para alumina, sílica e zinco (Elaborada pela autora).

Para a alumina, o valor obtido para a constante  $K$  (0,0611) tem uma diferença de 61,33% em relação ao valor obtido da multiplicação dos fatores da fórmula não calibrada de Gy (0,158), enquanto o valor obtido para a constante  $\alpha$  (1,818) tem uma diferença de 39,40% em relação ao expoente do diâmetro (3) da fórmula não calibrada de Gy.

Para o minério de zinco, o valor obtido para a constante K (6,0513) tem uma diferença de 11,46% em relação ao valor obtido da multiplicação dos fatores da fórmula não calibrada de Gy (6,8343) enquanto o valor obtido para a constante  $\alpha$  (2,568) tem uma diferença de 11,40% em relação ao expoente do diâmetro (3) da fórmula não calibrada de Gy.

Essas diferenças mostram a necessidade de se realizar o teste de heterogeneidade para estimar a heterogeneidade intrínseca do minério e calcular massas mínimas de amostras e protocolos de amostragem ótimos. A fórmula não calibrada de Gy fornece uma aproximação, mas não substitui o teste de heterogeneidade.

A Tabela 9 reúne, de forma resumida, os dados obtidos de variabilidade natural e de heterogeneidade intrínseca dos minérios estudados.

Tabela 9 – Resumo dos dados discutidos para a bauxita e o minério de zinco (Elaborada pela autora).

Minérios		Alumínio (Bauxita)	Zinco
Processo genético		Laterização	Interação de fluidos, com intensa alteração hidrotermal, com controle estutural e estratigráfico.
Variabilidade natural relativa		Baixa C.V do teor varia entre 0,02 a 0,03.	Média C.V do teor varia entre 0,15 a 0,31.
Heterogeneidade de Constituição	Constituição mineralógica*	Gibbsita, Caulinita, Hematita, Quartzo e Anatásio	Willemita, Dolomita, Quartzo, Hematita, Barita, Apatita, Franklinita, Zincita e Magnetita
Heterogeneidade intrínseca		K= 0,0611; Alpha=1,818	K= 6,0513; Alpha=2,568
Fórmula de Gy (não calibrada)		$S^2_{FSE} = 0,158d^3 \left( \frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right)$	$S^2_{FSE} = 6,834d^3 \left( \frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right)$
Fórmula de Gy (calibrada)		$S^2_{FSE} = 0,0611d^{1,818} \left( \frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right)$	$S^2_{FSE} = 6,0513d^{2,568} \left( \frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right)$

\*Constituição mineralógica e processo genético segundo a bibliografia apresentada, os demais dados foram obtidos neste trabalho.

Para o minério de alumínio, é possível observar que o processo genético de formação do depósito condicionou uma variabilidade natural relativamente baixa. Mesmo com uma heterogeneidade vertical da composição química do perfil de alteração relativamente alta, há uma homogeneidade estatística considerando um lote de material referente a um único horizonte de minério, devido à baixa variabilidade horizontal do depósito. Esta baixa variabilidade do horizonte de minério se expressa em valores baixos de coeficiente de variação do teor, e em um intervalo muito pequeno de variação. A variabilidade, por sua vez, condiciona para uma heterogeneidade constitucional baixa, mensurada pelos baixos valores de heterogeneidade intrínseca.

Para o minério de zinco, além dos teores mais baixos, o complexo processo genético resultou em uma variabilidade natural relativamente média, expressa por valores de coeficiente de variação de grandeza e amplitude de variação intermediária. A variabilidade



natural ao longo deste depósito é tanto vertical, quanto horizontal, devido ao controle estrutural e estratigráfico da mineralização. A heterogeneidade constitucional se expressa por uma assembleia mineralógica maior e mais complexa, mensurada pela heterogeneidade intrínseca do minério e, principalmente pela constante K, que é aproximadamente cem vezes maior que a mesma constante para o minério de alumínio (bauxita).

## 7. CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser feitas a partir dos resultados apresentados:

- A partir da análise microscópica dos grãos foi possível obter uma primeira indicação da mineralogia que compõe as faixas granulométricas e da heterogeneidade de constituição dos minérios.
- Os minerais de minério dos materiais estudados se concentram nas maiores frações granulométricas, assim como os teores médios obtidos por lotes.
- Através do teste de heterogeneidade foi possível obter os parâmetros de amostragem K e  $\alpha$  e, assim, mensurar a heterogeneidade intrínseca dos minérios, além de calibrar as constantes para a fórmula de Gy.
- A diferença entre as fórmulas de Gy calibradas e não calibradas é substancial, o que ressalta a importância de se realizar o teste de heterogeneidade para um cálculo correto de massas mínimas de amostras representativas e uma otimização eficaz dos protocolos de amostragem.
- Os dados obtidos de variância do erro fundamental de amostragem contribuem para a otimização dos protocolos de amostragem das respectivas minas, bem como para uma indicação preliminar da heterogeneidade intrínseca de outros minérios semelhantes aos estudados.
- Em análise conjunta dos dados de bibliografia, mineralogia, coeficiente de variação do teor e heterogeneidade intrínseca, foi possível associar a variabilidade natural do minério com a heterogeneidade intrínseca dos lotes estudados. Como resultados, o minério de alumínio (bauxita) apresentou baixa variabilidade natural e heterogeneidade intrínseca, enquanto o minério de zinco apresentou média variabilidade natural e heterogeneidade intrínseca (representada por K) da ordem de cem vezes maior do que o minério de alumínio (bauxita).
- Para detalhar a heterogeneidade de constituição das frações granulométricas, seriam necessárias mais lâminas e técnicas de alta resolução para a caracterização mineralógica.

- Por fim, mensurar a heterogeneidade constitucional de um minério é, portanto, aumentar o conhecimento sobre ele, o que pode propiciar melhorias nos processos de amostragem e, conseqüentemente, na confiabilidade das estimativas, refletindo em mudanças na operação e contribuindo para que se alcance menor custo financeiro e maior controle ambiental.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAL (Associação Brasileira do Alumínio). (2017). *Bauxita no Brasil: Mineração responsável e competitividade*. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), <[http://www.abal.org.br/downloads/ABAL\\_Relatorio\\_Bauxita\\_2017\\_1.pdf](http://www.abal.org.br/downloads/ABAL_Relatorio_Bauxita_2017_1.pdf)>.
- Boulangé, B., Carvalho, A., (1997). The bauxite of Porto Trombetas. In: A. Carvalho, B. Boulangé, A.J. Melfi, Y. Lucas (Eds.), *Brazilian Bauxites* (55- 73). São Paulo: USP, FAPESP; Paris: ORSTOM.
- Carvalho, A. (1989). *As Bauxitas no Brasil*. Tese (Livre Docência). São Paulo: Departamento de Geografia, USP.
- Chierigati, A.C., Pitard, F.F. (2012). Fundamentos teóricos da amostragem. In: Chaves, A.P. (Org.), *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios* (v. 5, 323-364). São Paulo: Oficina de Textos.
- Chierigati, A.C., Pitard, F.F. (2018). Amostragem. In: A. B. Luz, S. C. A. França, P. F.A. Braga (Eds.), *Tratamento de Minérios* (27-65). Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC.
- Costa, M. L. (2016). Alumínio e Bauxita no Brasil. In: A. J. Melfi, A. Misi, D. A. Campos, U. G. Cordani (Org.) *Recursos Minerais do Brasil: problemas e desafios* (166-173). Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências.
- Dardenne, M. A. (1978). Zonação tectônica na borda ocidental do Cráton São Francisco. *Anais do Congresso Brasileiro de Geologia* 30(1), 299-308.
- Dardenne, M. A. (2000). The Brasília fold belt. *Tectonic Evolution of South America*. 31st International Geological Congress, 31, 231-263.
- François-Bongarçon, D., GY, P. M. (2002). Critical aspects in mill and plants: a guide to understanding sampling audits. *Journal of the South African IMM*, 102(8), 484-484.
- Grossi Sad, J. H. (1986). *Fundamentos sobre a variabilidade dos depósitos minerais*. Rio de Janeiro: DNPM/CPRM-GEOSOL.
- Gy, P. M. (1979). *Sampling of particulate materials*. Amsterdam: Elsevier.
- GY, P.M. (1992). Sampling of heterogeneous and dynamic material systems: theories of heterogeneity, sampling and homogenizing. Amsterdam: Elsevier.
- Gy, P. M. (1998). *Sampling for analytical purposes*. New York: John Willey & Sons.

- Hitzman, M. W., Reynolds, N. A., Sangster, D. F., Allen, C. R., Carman, C. E. (2003). Classification, genesis, and exploration guides for nonsulfide zinc deposits. *Economic Geology*, 98(4), 685-714.
- Koch, G S. Jr., Link, R. F. (1970). *Statistical Analysis of Geological Data*. New York: John Willey & Sons.
- Kotschoubey, B., Calaf, J. M. C., Lobato, A. C. C., Leite, A. S., Azevedo, C. H. D. (2005). Caracterização e gênese dos depósitos de bauxita da Província Bauxitífera de Paragominas, noroeste da bacia do Grajaú, nordeste do Pará/oeste do Maranhão. In: DNPM/CT-Mineral/FINEP/ADIMB (Org.). *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*, (687-782). Brasília: ADIMB/DNPM.
- Monteiro, L. V. S. (2002). Modelamento Metalogenético dos Depósitos de Zinco de Vazante, Fagundes e Ambrósia, associados ao Grupo Vazante, Minas Gerais. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, USP.
- Monteiro, L. V. S., Bettencourt, J. S., Juliani, C., Oliveira, T. F. (2006). Geology, petrography, and mineral chemistry of the Vazante non-sulfide and Ambrósia and Fagundes sulfide-rich carbonate-hosted Zn–(Pb) deposits, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 28(2), 201-234.
- Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert. (2017). *Banco de Dados De Rochas e Minerais*. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. [banco de dados], <<https://museuhe.com.br/banco-de-dados/>>.
- Olivo, G. R., Monteiro, L. V., Baia, F., Slezak, P., Carvalho, I., Fernandes, N. A., Oliveira, G. D.; Neto, B. B.; McGladrey, A.; Silva, A. M.; Moura, M. A.; Lyton-Mathews, D. (2018). The Proterozoic Vazante hypogene zinc silicate district, Minas Gerais, Brazil: a review of the ore system applied to mineral exploration. *Minerals*, 8(1), 22-39.
- Prado, G. C. (2018). Comparação entre a heterogeneidade intrínseca calibrada e calculada do minério de alumínio de uma região no oeste do Pará. Trabalho de formatura em Engenharia de Minas. Escola Politécnica da USP.
- Pitard, F.F. (1993). *Pierre Gy's sampling theory and sampling practice: heterogeneity, sampling correctness, and statistical process control*. Boca Raton: CRC Press.
- Toledo, M. C. M., Oliveira, S. M. B., Melfi, A. J. (2000). Intemperismo e formação do solo. In: W. Texeira, T. R. Fairchild, M. C. M. Toledo, F. Taioli (Org.), *Decifrando a Terra*. (210-239). São Paulo: Companhia Editora Nacional.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1 – DADOS EXPERIMENTAIS DA ALUMINA

Teste de Heterogeneidade BAUXITA - Al (%)											
Lote -4,75+3,35 mm			Lote -6,35+4,75 mm			Lote -12,7+6,35 mm			Lote -25,4+12,7 mm		
Amostra	m (g)	Al(%)	Amostra	m (g)	Al(%)	Amostra	m (g)	Al(%)	Amostra	m (g)	Al(%)
TH 301	58,0	53,01	TH 401	122,0	52,98	TH 601	196,0	50,60	TH 1201	730,0	57,75
TH 302	50,0	54,06	TH 402	132,0	54,18	TH 602	236,0	52,39	TH 1202	682,0	58,15
TH 303	48,0	52,95	TH 403	106,0	52,94	TH 603	258,0	54,56	TH 1203	488,0	57,99
TH 304	46,0	53,32	TH 404	126,0	52,91	TH 604	104,0	54,12	TH 1204	622,0	58,39
TH 305	44,0	54,73	TH 405	104,0	54,11	TH 605	232,0	53,98	TH 1205	422,0	57,38
TH 306	46,0	54,68	TH 406	120,0	53,05	TH 606	216,0	55,91	TH 1206	532,0	58,46
TH 307	44,0	56,00	TH 407	102,0	54,25	TH 607	198,0	53,91	TH 1207	496,0	56,47
TH 308	44,0	55,12	TH 408	124,0	53,10	TH 608	234,0	53,40	TH 1208	572,0	58,44
TH 309	46,0	54,85	TH 409	116,0	52,39	TH 609	204,0	57,50	TH 1209	390,0	55,08
TH 310	50,0	55,25	TH 410	102,0	54,22	TH 610	212,0	53,03	TH 1210	592,0	54,78
TH 311	48,0	53,70	TH 411	116,0	55,82	TH 611	180,0	54,76	TH 1211	446,0	57,63
TH 312	58,0	53,85	TH 412	98,0	54,52	TH 612	224,0	53,56	TH 1212	550,0	58,00
TH 313	44,0	55,47	TH 413	114,0	55,19	TH 613	188,0	55,76	TH 1213	376,0	56,00
TH 314	56,0	53,11	TH 414	100,0	55,75	TH 614	180,0	55,15	TH 1214	502,0	58,70
TH 315	54,0	52,46	TH 415	112,0	53,37	TH 615	176,0	55,56	TH 1215	364,0	55,34
TH 316	54,0	54,66	TH 416	102,0	52,84	TH 616	198,0	53,39	TH 1216	430,0	52,11
TH 317	44,0	52,73	TH 417	100,0	53,52	TH 617	220,0	53,83	TH 1217	338,0	57,49
TH 318	52,0	52,39	TH 418	118,0	52,93	TH 618	182,0	53,53	TH 1218	502,0	58,99
TH 319	50,0	52,57	TH 419	114,0	53,02	TH 619	206,0	53,77	TH 1219	474,0	57,55
TH 320	50,0	53,07	TH 420	104,0	53,61	TH 620	198,0	54,44	TH 1220	388,0	56,99
TH 321	42,0	52,97	TH 421	114,0	54,30	TH 621	208,0	53,53	TH 1221	340,0	57,83
TH 322	50,0	52,43	TH 422	104,0	54,65	TH 622	182,0	54,29	TH 1222	426,0	55,72
TH 323	56,0	52,69	TH 423	112,0	51,03	TH 623	174,0	56,20	TH 1223	426,0	59,69
TH 324	48,0	52,78	TH 424	104,0	53,27	TH 624	158,0	54,78	TH 1224	366,0	57,43
TH 325	46,0	51,78	TH 425	110,0	52,99	TH 625	190,0	55,62	TH 1225	374,0	56,34
TH 336	58,0	52,02	TH 426	94,0	52,22	TH 626	186,0	55,81	TH 1226	496,0	56,59
TH 327	60,0	53,14	TH 427	118,0	52,66	TH 627	200,0	54,36	TH 1227	382,0	53,55
TH 328	60,0	52,97	TH 428	108,0	54,75	TH 628	168,0	53,54	TH 1228	242,0	55,51
TH 329	60,0	54,74	TH 429	102,0	54,23	TH 629	180,0	52,83	TH 1229	266,0	55,13
TH 330	56,0	51,69	TH 430	106,0	54,53	TH 630	170,0	50,59	TH 1230	458,0	54,91
TH 331	46,0	52,16	TH 431	106,0	53,13	TH 631	174,0	53,65	TH 1231	410,0	55,61
TH 332	48,0	52,37	TH 432	112,0	53,70	TH 632	150,0	55,95	TH 1232	328,0	58,59
TH 333	48,0	52,64	TH 433	100,0	56,08	TH 633	180,0	56,74	TH 1233	368,0	54,89
TH 334	56,0	52,74	TH 434	98,0	54,39	TH 634	144,0	56,32	TH 1234	412,0	58,07
TH 335	54,0	53,84	TH 435	102,0	54,05	TH 635	186,0	53,76	TH 1235	312,0	56,91
TH 336	48,0	54,26	TH 436	104,0	55,98	TH 636	158,0	53,38	TH 1236	380,0	56,71
TH 337	48,0	53,39	TH 437	110,0	53,39	TH 637	146,0	53,82	TH 1237	372,0	56,72
TH 338	50,0	51,61	TH 438	108,0	52,44	TH 638	166,0	55,83	TH 1238	398,0	57,22
TH 339	56,0	52,76	TH 439	106,0	53,16	TH 639	194,0	55,37	TH 1239	294,0	56,17
TH 340	54,0	52,92	TH 440	106,0	52,72	TH 640	156,0	53,16	TH 1240	382,0	56,47
TH 341	48,0	53,26	TH 441	106,0	53,12	TH 641	200,0	53,68	TH 1241	238,0	59,01
TH 342	48,0	52,10	TH 442	110,0	54,41	TH 642	134,0	54,68	TH 1242	630,0	60,14
TH 343	54,0	53,09	TH 443	104,0	53,67	TH 643	196,0	54,77	TH 1243	340,0	57,71
TH 344	52,0	52,29	TH 444	108,0	53,14	TH 644	182,0	58,28	TH 1244	382,0	58,73
TH 345	50,0	53,99	TH 445	106,0	52,67	TH 645	150,0	55,30	TH 1245	330,0	56,85
TH 346	54,0	52,99	TH 446	106,0	54,55	TH 646	188,0	57,15	TH 1246	352,0	57,06
TH 347	54,0	52,89	TH 447	104,0	54,50	TH 647	148,0	56,77	TH 1247	464,0	58,82
TH 348	50,0	51,67	TH 448	104,0	56,13	TH 648	174,0	56,18	TH 1248	392,0	58,66
TH 349	48,0	53,11	TH 449	104,0	52,44	TH 649	132,0	55,07	TH 1249	338,0	58,51
TH 350	54,0	52,03	TH 450	102,0	52,39	TH 650	190,0	52,57	TH 1250	412,0	59,95

## ANEXO 2 – DADOS EXPERIMENTAIS DA SÍLICA REATIVA



Teste de Heterogeneidade BAUXITA - Si (%)											
Lote -4,75+3,35 mm			Lote -6,35+4,75 mm			Lote -12,7+6,35 mm			Lote -25,4+12,7 mm		
Amostra	m (g)	Si(%)	Amostra	m (g)	Si(%)	Amostra	m (g)	Si(%)	Amostra	m (g)	Si(%)
TH 301	58,0	4,62	TH 401	122,0	4,37	TH 601	196,0	3,90	TH 1201	730,0	4,47
TH 302	50,0	4,54	TH 402	132,0	4,45	TH 602	236,0	4,22	TH 1202	682,0	3,19
TH 303	48,0	4,68	TH 403	106,0	3,76	TH 603	258,0	4,03	TH 1203	488,0	3,38
TH 304	46,0	4,56	TH 404	126,0	4,41	TH 604	104,0	3,89	TH 1204	622,0	3,41
TH 305	44,0	4,48	TH 405	104,0	4,08	TH 605	232,0	4,03	TH 1205	422,0	3,62
TH 306	46,0	4,52	TH 406	120,0	4,19	TH 606	216,0	4,24	TH 1206	532,0	3,32
TH 307	44,0	4,51	TH 407	102,0	3,89	TH 607	198,0	4,23	TH 1207	496,0	3,84
TH 308	44,0	4,26	TH 408	124,0	4,42	TH 608	234,0	4,01	TH 1208	572,0	3,49
TH 309	46,0	4,48	TH 409	116,0	4,24	TH 609	204,0	4,31	TH 1209	390,0	3,14
TH 310	50,0	4,39	TH 410	102,0	3,93	TH 610	212,0	4,08	TH 1210	592,0	3,70
TH 311	48,0	4,86	TH 411	116,0	4,24	TH 611	180,0	3,52	TH 1211	446,0	2,78
TH 312	58,0	4,89	TH 412	98,0	4,47	TH 612	224,0	3,77	TH 1212	550,0	2,82
TH 313	44,0	4,19	TH 413	114,0	4,59	TH 613	188,0	3,57	TH 1213	376,0	3,24
TH 314	56,0	4,77	TH 414	100,0	4,09	TH 614	180,0	3,66	TH 1214	502,0	3,03
TH 315	54,0	4,96	TH 415	112,0	4,21	TH 615	176,0	4,16	TH 1215	364,0	3,60
TH 316	54,0	4,54	TH 416	102,0	4,17	TH 616	198,0	3,85	TH 1216	430,0	3,43
TH 317	44,0	4,05	TH 417	100,0	4,19	TH 617	220,0	3,62	TH 1217	338,0	3,53
TH 318	52,0	4,26	TH 418	118,0	4,51	TH 618	182,0	3,89	TH 1218	502,0	3,45
TH 319	50,0	4,32	TH 419	114,0	4,71	TH 619	206,0	3,74	TH 1219	474,0	3,49
TH 320	50,0	4,04	TH 420	104,0	4,70	TH 620	198,0	3,82	TH 1220	388,0	3,25
TH 321	42,0	4,05	TH 421	114,0	4,45	TH 621	208,0	4,00	TH 1221	340,0	2,74
TH 322	50,0	4,34	TH 422	104,0	4,78	TH 622	182,0	4,00	TH 1222	426,0	3,58
TH 323	56,0	4,34	TH 423	112,0	4,23	TH 623	174,0	3,83	TH 1223	426,0	3,30
TH 324	48,0	4,16	TH 424	104,0	4,01	TH 624	158,0	4,27	TH 1224	366,0	3,67
TH 325	46,0	3,96	TH 425	110,0	4,23	TH 625	190,0	4,50	TH 1225	374,0	3,47
TH 336	58,0	4,78	TH 426	94,0	4,12	TH 626	186,0	4,21	TH 1226	496,0	3,55
TH 327	60,0	5,15	TH 427	118,0	3,96	TH 627	200,0	4,15	TH 1227	382,0	2,91
TH 328	60,0	4,78	TH 428	108,0	4,61	TH 628	168,0	4,77	TH 1228	242,0	3,07
TH 329	60,0	4,59	TH 429	102,0	4,50	TH 629	180,0	4,02	TH 1229	266,0	3,39
TH 330	56,0	4,26	TH 430	106,0	4,73	TH 630	170,0	3,90	TH 1230	458,0	3,07
TH 331	46,0	4,1	TH 431	106,0	4,98	TH 631	174,0	4,00	TH 1231	410,0	2,85
TH 332	48,0	4,06	TH 432	112,0	4,81	TH 632	150,0	3,97	TH 1232	328,0	3,34
TH 333	48,0	4,09	TH 433	100,0	4,51	TH 633	180,0	3,97	TH 1233	368,0	4,09
TH 334	56,0	4,09	TH 434	98,0	4,50	TH 634	144,0	4,03	TH 1234	412,0	3,47
TH 335	54,0	4,46	TH 435	102,0	4,46	TH 635	186,0	3,79	TH 1235	312,0	3,43
TH 336	48,0	4,57	TH 436	104,0	4,39	TH 636	158,0	4,28	TH 1236	380,0	2,79
TH 337	48,0	4,01	TH 437	110,0	4,11	TH 637	146,0	4,23	TH 1237	372,0	3,08
TH 338	50,0	4,20	TH 438	108,0	4,19	TH 638	166,0	4,18	TH 1238	398,0	3,23
TH 339	56,0	4,39	TH 439	106,0	4,22	TH 639	194,0	4,55	TH 1239	294,0	3,33
TH 340	54,0	4,26	TH 440	106,0	4,21	TH 640	156,0	3,96	TH 1240	382,0	3,30
TH 341	48,0	4,19	TH 441	106,0	4,07	TH 641	200,0	3,90	TH 1241	238,0	3,88
TH 342	48,0	4,09	TH 442	110,0	4,09	TH 642	134,0	3,53	TH 1242	630,0	3,25
TH 343	54,0	4,35	TH 443	104,0	3,98	TH 643	196,0	3,55	TH 1243	340,0	3,84
TH 344	52,0	4,11	TH 444	108,0	3,85	TH 644	182,0	4,15	TH 1244	382,0	2,96
TH 345	50,0	4,60	TH 445	106,0	4,18	TH 645	150,0	4,48	TH 1245	330,0	3,54
TH 346	54,0	4,93	TH 446	106,0	4,65	TH 646	188,0	3,84	TH 1246	352,0	3,28
TH 347	54,0	3,95	TH 447	104,0	4,69	TH 647	148,0	3,96	TH 1247	464,0	2,89
TH 348	50,0	4,44	TH 448	104,0	4,45	TH 648	174,0	3,58	TH 1248	392,0	3,06
TH 349	48,0	4,05	TH 449	104,0	4,15	TH 649	132,0	3,95	TH 1249	338,0	3,63
TH 350	54,0	4,23	TH 450	102,0	4,13	TH 650	190,0	3,90	TH 1250	412,0	3,36

### ANEXO 3 – DADOS EXPERIMENTAIS DO ZINCO

Teste de Heterogeneidade ZINCO											
Lote -4,75+3,35 mm			Lote -6,35+4,75 mm			Lote -12,7+6,35 mm			Lote -25,4+12,7 mm		
Amostra	m (g)	Zn(%)	Amostra	m (g)	Zn(%)	Amostra	m (g)	Zn(%)	Amostra	m (g)	Zn(%)
TH 301	52,4	5,12	TH 401	112,4	8,31	TH 601	241,1	7,40	TH 1201	604,5	9,88
TH 302	49,5	5,69	TH 402	103,1	6,15	TH 602	178,4	6,67	TH 1202	575,6	11,45
TH 303	44,4	5,99	TH 403	102,3	7,38	TH 603	228,9	5,73	TH 1203	434,0	7,39
TH 304	47,9	7,39	TH 404	103,2	9,01	TH 604	203,6	6,77	TH 1204	576,4	7,50
TH 305	46,5	5,93	TH 405	108,3	8,46	TH 605	213,9	8,91	TH 1205	404,3	10,25
TH 306	51,5	4,59	TH 406	106,3	7,64	TH 606	256,8	8,17	TH 1206	508,9	9,75
TH 307	53,3	4,58	TH 407	107,8	6,59	TH 607	221,2	8,31	TH 1207	571,4	4,76
TH 308	49,1	4,75	TH 408	102,6	7,20	TH 608	202,5	9,61	TH 1208	536,8	5,07
TH 309	40,4	7,01	TH 409	104,3	7,73	TH 609	209,2	14,03	TH 1209	465,3	8,87
TH 310	47,3	5,30	TH 410	98,7	7,05	TH 610	211,8	6,52	TH 1210	381,2	8,06
TH 311	44,6	5,79	TH 411	96,5	7,36	TH 611	225,5	5,94	TH 1211	486,3	5,08
TH 312	46,9	5,37	TH 412	109,9	4,82	TH 612	225,4	4,49	TH 1212	506,3	6,89
TH 313	43,4	6,13	TH 413	102,4	8,21	TH 613	212,5	4,30	TH 1213	391,2	9,98
TH 314	44,5	6,34	TH 414	100,2	6,75	TH 614	212,9	8,23	TH 1214	426,8	6,68
TH 315	47,1	6,54	TH 415	93,9	6,71	TH 615	224,1	7,36	TH 1215	465,7	5,66
TH 316	41,5	7,65	TH 416	83,5	7,80	TH 616	213,6	12,37	TH 1216	483,7	6,27
TH 317	46,5	6,09	TH 417	103,0	8,56	TH 617	228,3	5,83	TH 1217	604,0	6,44
TH 318	43,1	5,09	TH 418	89,0	7,76	TH 618	222,2	5,90	TH 1218	461,6	7,51
TH 319	44,9	7,04	TH 419	99,6	10,75	TH 619	200,0	7,56	TH 1219	415,0	6,35
TH 320	46,5	5,62	TH 420	91,3	6,86	TH 620	210,9	7,76	TH 1220	430,3	8,44
TH 321	42,6	7,98	TH 421	86,9	7,16	TH 621	226,1	8,42	TH 1221	463,8	7,70
TH 322	45,4	6,35	TH 422	99,5	7,15	TH 622	183,2	5,11	TH 1222	537,3	6,09
TH 323	43,1	6,40	TH 423	83,7	7,04	TH 623	227,1	6,71	TH 1223	349,8	9,44
TH 324	46,2	5,76	TH 424	96,0	5,70	TH 624	219,6	7,18	TH 1224	589,6	12,82
TH 325	46,7	6,86	TH 425	84,9	10,22	TH 625	220,0	9,02	TH 1225	674,6	12,37
TH 336	44,9	6,35	TH 426	98,5	6,41	TH 626	188,1	8,68	TH 1226	429,4	9,41
TH 327	43,6	5,35	TH 427	94,2	8,81	TH 627	239,9	8,05	TH 1227	561,2	5,10
TH 328	50,1	7,47	TH 428	98,2	9,42	TH 628	221,3	11,79	TH 1228	689,5	10,30
TH 329	49,4	8,02	TH 429	81,0	7,51	TH 629	220,0	13,52	TH 1229	794,3	9,26
TH 330	47,5	5,23	TH 430	97,0	8,62	TH 630	212,3	7,41	TH 1230	731,8	11,56
TH 331	46,3	5,49	TH 431	85,0	8,01	TH 631	217,5	7,24	TH 1231	660,9	10,64
TH 332	42,3	5,70	TH 432	96,9	8,15	TH 632	206,7	10,81	TH 1232	552,1	2,12
TH 333	42,9	6,93	TH 433	83,7	8,10	TH 633	203,6	4,89	TH 1233	786,5	9,57
TH 334	41,4	7,21	TH 434	83,5	7,82	TH 634	213,8	12,15	TH 1234	513,7	3,62
TH 335	37,6	6,98	TH 435	98,1	7,52	TH 635	220,8	7,39	TH 1235	683,8	6,85
TH 336	40,3	5,37	TH 436	99,5	7,58	TH 636	213,0	9,36	TH 1236	481,3	7,99
TH 337	40,7	7,94	TH 437	85,5	6,43	TH 637	199,1	12,05	TH 1237	665,2	2,43
TH 338	43,0	5,28	TH 438	100,2	8,70	TH 638	228,6	7,97	TH 1238	576,7	4,44
TH 339	40,4	6,88	TH 439	85,8	8,82	TH 639	193,6	9,28	TH 1239	601,9	9,78
TH 340	41,7	6,75	TH 440	81,6	6,32	TH 640	206,2	5,05	TH 1240	701,1	6,94
TH 341	43,5	5,09	TH 441	98,9	6,91	TH 641	227,9	8,01	TH 1241	543,8	8,68
TH 342	42,5	8,12	TH 442	83,9	7,41	TH 642	207,8	5,96	TH 1242	628,3	6,14
TH 343	44,0	5,66	TH 443	100,2	8,16	TH 643	192,5	5,02	TH 1243	586,2	11,02
TH 344	40,5	5,52	TH 444	85,5	8,19	TH 644	199,9	8,06	TH 1244	609,7	11,64
TH 345	43,0	4,82	TH 445	101,7	6,34	TH 645	216,7	8,29	TH 1245	711,5	11,02
TH 346	42,9	6,70	TH 446	84,2	7,29	TH 646	205,5	9,16	TH 1246	715,9	8,29
TH 347	41,0	6,63	TH 447	103,1	9,00	TH 647	197,4	10,21	TH 1247	480,5	11,32
TH 348	37,4	4,96	TH 448	84,3	7,31	TH 648	205,0	11,77	TH 1248	555,4	6,56
TH 349	39,8	6,76	TH 449	91,3	8,28	TH 649	178,9	13,76	TH 1249	449,0	8,32
TH 350	39,5	5,29	TH 450	97,6	5,69	TH 650	177,3	6,01	TH 1250	577,5	5,99