

**FLÁVIA DE LIMA FERNANDES**

**OTIMIZAÇÃO DE PROTOCOLOS DE AMOSTRAGEM DE MINÉRIO  
DE NÍQUEL COM BASE NO TESTE DE HETEROGENEIDADE**

**São Paulo**

**2016**

**FLÁVIA DE LIMA FERNANDES**

**OTIMIZAÇÃO DE PROTOCOLOS DE AMOSTRAGEM DE MINÉRIO  
DE NÍQUEL COM BASE NO TESTE DE HETEROGENEIDADE**

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

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

**São Paulo**

**2016**

TF-2016

F3910

Syano 2798610

H2016e

**DEDALUS - Acervo - EPMI**



31700010024

Catálogo-na-publicação

Fernandes, Flávia de Lima

Otimização de Protocolos de Amostragem de Minério de Níquel com Base no Teste de Heterogeneidade / F. L. Fernandes -- São Paulo, 2016.  
38 p.

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

1.Amostragem de Minerais 2.Níquel 3.Estudo de Caso (Niquelândia (GO))  
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

À minha mãe, por todo o carinho e  
aporte que tornaram possível a  
minha formação.

## AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ana Carolina Chierregati, a quem pude recorrer sempre, por me dar todo o apoio necessário para o desenvolvimento deste trabalho, pelo constante estímulo e por ser um exemplo a ser seguido.

Ao corpo docente do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Universidade de São Paulo, por todos os ensinamentos acadêmicos e compartilhamento de sua vasta experiência, contribuindo para o meu crescimento pessoal e profissional.

Ao Lacasemin e à Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Renata Stellan, por toda a convivência durante os meus últimos anos de graduação e lições aprendidas.

A todos os colegas, pelo incentivo e ajuda, com quem pude partilhar todos os momentos da minha vida acadêmica.

## RESUMO

O erro fundamental de amostragem é gerado sempre que uma amostra é retirada de um lote e ocorre em função de uma característica intrínseca dos depósitos minerais: a heterogeneidade de constituição do minério. Assim sendo, o erro fundamental é o único erro que nunca pode ser anulado em processos de amostragem mineral, mas pode ser reduzido até valores aceitáveis.

A otimização de protocolos de amostragem é feita com base na minimização do erro fundamental e é essencial para diminuir os desvios das estimativas de teor em operações mineiras, aumentando a confiabilidade nos resultados para o planejamento mineiro, controle de processos e reconciliação.

A fim de propor um protocolo de amostragem otimizado para o minério de níquel da Unidade de Niquelândia da Votorantim Metais, realizou-se o teste de heterogeneidade, um método experimental proposto por Pitard (1993) para estimar a heterogeneidade intrínseca do minério. Com base nos resultados do teste de heterogeneidade, foram calculados os desvios padrão do erro fundamental em cada etapa do protocolo de amostragem e de preparação de amostras e foram propostos novos protocolos de amostragem, nos quais o desvio total do erro fundamental se encontra dentro das recomendações feitas pela Teoria da Amostragem de Pierre Gy.

Palavras-chave: Teste de Heterogeneidade. Minério de níquel. Amostragem. Protocolo de amostragem. Teoria de Amostragem.

## ABSTRACT

The fundamental sampling error is generated whenever a sample is taken from a lot and is due to an intrinsic characteristic of mineral deposits: the constitutional heterogeneity of the ore. Thus, the fundamental error is the only error that can never be eliminated in mineral sampling processes, but can be reduced to acceptable values.

The optimization of sampling protocols is based on the minimization of the fundamental error and is essential to reduce the deviations of the grade estimates in mining operations, increasing reliability in the results used for mining planning, process control and reconciliation.

In order to propose an optimized sampling protocol for the nickel ore of the Votorantim Metais Niquelândia, a heterogeneity test was performed, which is an experimental method proposed by Pitard (1993) to estimate the intrinsic heterogeneity of the ore. Based on the results of the heterogeneity test, the standard deviations of the fundamental sampling error were calculated at each step of the sampling and sample preparation protocol and new sampling protocols were proposed in which the total deviation of the fundamental error is within the recommendations made by Pierre Gy's Sampling Theory.

Keywords: Heterogeneity test. Nickel ore. Sampling. Sampling Protocol. Sampling Theory.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Amostras de minério de níquel utilizadas no teste .....	18
Figura 2: Fluxograma de coleta de amostras para o teste .....	18
Figura 3 - Fração fina .....	19
Figura 4 - fração intermediária.....	20
Figura 5 - Fração grossa .....	20
Figura 6 - Esquema do teste de heterogeneidade .....	21
Figura 7 - Planta da Unidade Niquelândia - Votorantim Metais.....	23
Figura 8 - Correia de alimentação da usina (material blendado) .....	24
Figura 9 - Estoque onde é feita a amostragem manual .....	25
Figura 10: Retirada da amostra primária.....	25
Figura 11 - IHL em função do diâmetro nominal do fragmento - Minério Silicatado .....	26
Figura 12 - IHL em função do diâmetro nominal do fragmento - Minério Oxidado.....	27
Figura 13 - IHL em função do diâmetro nominal do fragmento - Minério Blendado .....	27
Figura 14 - Fluxograma simplificado do protocolo atual de amostragem .....	29



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frações utilizadas para realização do teste em cada tipo de minério .....	19
Tabela 2 - Número de quadrados internos da malha e fragmentos por amostra .....	21
Tabela 3 - $IH_L$ em função dos diâmetros nominais das frações .....	26
Tabela 4 - Protocolo atual – minério silicatado.....	30
Tabela 5 - Protocolo atual - minério oxidado.....	30
Tabela 6 - Protocolo atual - minério blendado .....	30
Tabela 7 - Protocolo sugerido - minério silicatado .....	31
Tabela 8 - Protocolo sugerido - minério oxidado.....	31
Tabela 9 - Protocolo sugerido - minério blendado .....	32
Tabela 10: Massas mínimas obtidas pela Fórmula de Gy .....	32

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2. OBJETIVO .....</b>	<b>10</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>11</b>
3.1. TEORIA DE AMOSTRAGEM .....	11
3.2. HETEROGENEIDADE DE CONSTITUIÇÃO ( $CH_L$ ) .....	11
3.3. O ERRO FUNDAMENTAL (FSE) .....	11
3.4. ESTIMATIVA INDIRETA DO FATOR CONSTANTE DE HETEROGENEIDADE $IH_L$ .....	15
3.5. OTIMIZAÇÃO DE PROTOCOLOS DE AMOSTRAGEM.....	17
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>18</b>
<b>5. DESCRIÇÃO DA MINERAÇÃO ESTUDADA.....</b>	<b>23</b>
<b>6. RESULTADOS OBTIDOS.....</b>	<b>26</b>
<b>7. DISCUSSÃO .....</b>	<b>29</b>
7.1. PROTOCOLO ATUAL DE AMOSTRAGEM .....	29
7.2. PROTOCOLO DE AMOSTRAGEM SUGERIDO.....	30
<b>8. CONCLUSÕES .....</b>	<b>33</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>35</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>36</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em empreendimentos mineiros, a amostragem é uma técnica aplicada em suas diversas etapas para análise das características de um dado lote de minério. Por motivos técnicos e econômicos, realiza-se esta análise em uma massa reduzida do lote inicial de minério, a qual deve possuir as propriedades de tal lote sem alterações significativas, ou seja, deve ser representativa. Para tanto, é necessário determinar um protocolo de amostragem apropriado às particularidades do minério.

Esta determinação de um procedimento adequado de amostragem é uma das premissas fundamentais ao sucesso de um empreendimento mineiro; entretanto, nas rotinas industriais, frequentemente a amostragem não recebe a devida importância. Caracterizações tecnológicas de alta precisão são um desperdício se não for antes mitigado o viés causado pelos erros derivados de propriedades intrínsecas ao minério. Tais desvios sempre existirão, contudo, estes devem estar dentro de um limite aceitável, de modo que a amostragem seja representativa e economicamente viável.

A título de exemplo do custo de erros de amostragem em vendas de minério, durante o curso do contrato entre uma mina de estanho Sul Americana e uma indústria de fundição Europeia, a amostragem manual extremamente enviesada custou à mineradora um total de US\$ 7 milhões ao longo de três anos. (GY, 1998)

Neste trabalho foi feito um estudo do minério de níquel, provindo da Unidade de Niquelândia (GO) da Votorantim Metais, a fim de otimizar o protocolo de amostragem atual e reduzir o erro fundamental de amostragem, promovendo significativa melhora nos processos de amostragem do empreendimento de maneira exequível.

Na primeira etapa deste estudo, realizou-se o teste de heterogeneidade pelo método indireto proposto por Pitard (1993) para a estimativa do fator constante de heterogeneidade constituinte, o  $IHL$ . Com os resultados desse teste, o protocolo de amostragem atual foi analisado e quantificou-se o desvio do erro fundamental, a fim de propor um protocolo de amostragem otimizado, com desvio do erro fundamental dentro de recomendado pelo Pitard (1993).

## **2. OBJETIVO**

O objetivo do presente trabalho é propor alternativas para a otimização dos protocolos de amostragem do minério de níquel da Unidade de Niquelândia da Votorantim Metais, de modo a reduzir o erro fundamental de amostragem até valores aceitáveis e aumentar a confiabilidade nos dados utilizados nas estimativas de teor da jazida.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Todos os itens a seguir estão baseados nos livros de Pitard (1993) e Chaves (2012).

#### 3.1. TEORIA DE AMOSTRAGEM

A amostragem é definida como uma sequência de operações, nas quais são retirados incrementos de um lote que se deseja amostrar, de modo que esta amostra seja representativa em relação à população da qual foi extraída. O principal objetivo da amostragem é reduzir a massa do lote até a massa adequada a determinado propósito, sem alterar as características de interesse (teor, densidade, distribuição granulométrica, etc.).

#### 3.2. HETEROGENEIDADE DE CONSTITUIÇÃO ( $CH_L$ )

A heterogeneidade de constituição considera as propriedades fundamentais dos fragmentos de um lote, como teor, forma, tamanho, mineralogia, etc, observando-os um a um. Por definição, o valor zero de heterogeneidade de constituição seria um lote constituído por fragmentos idênticos em forma, tamanho, densidade, entre outras características. Assim, em certo grau de cominuição, a heterogeneidade de constituição relativa aos fragmentos de um lote é propriedade intrínseca do lote e não varia, a não ser que seja realizada outra etapa de cominuição. (CHIEREGATI, 2007)

Segundo Chaves (2012): “Misturas ou homogeneizações não têm influência na heterogeneidade de constituição. Sendo assim, uma amostra  $S$  selecionada de um lote  $L$  é influenciada por um erro especificamente relacionado à heterogeneidade de constituição do mesmo lote. Esse erro é chamado erro fundamental de amostragem (FSE).”

#### 3.3. O ERRO FUNDAMENTAL (FSE)

O erro fundamental de amostragem é resultante da heterogeneidade de constituição do material. Essencialmente, este erro depende da massa amostrada, do diâmetro das partículas e, em menor escala, do material amostrado. É o erro que nunca será zero, mesmo em condições ideais de amostragem.

O cálculo da heterogeneidade constitucional  $CH_L$  envolve um grande número de fragmentos. Esta dificuldade pode ser superada fazendo-se o cálculo do fator constante de heterogeneidade constituinte  $IHL$ , ao custo de uma aproximação. (PITARD, 1993)

A aproximação a ser usada é baseada no fato de que frequentemente há uma forte correlação entre o conteúdo crítico de um fragmento e a sua densidade, enquanto a correlação entre o conteúdo crítico de um fragmento e seu tamanho usualmente não é relevante. Em outras palavras, se investigarmos o tamanho e densidade de uma fração  $L_{\alpha\beta}$  de um lote  $L$ , cada fragmento de  $L_{\alpha\beta}$  é representado pelo fragmento  $F_{\alpha\beta}$  caracterizado por seu volume  $v_{\alpha}$ , conforme a Equação 1, sua densidade  $\lambda_{\beta}$ , seu peso  $M_{F_{\alpha\beta}}$ , dado pela Equação 2, e seu teor  $a_{\alpha\beta}$ .

$$v_{\alpha} = f_{\alpha} \cdot d_{\alpha}^3 \quad (1)$$

Onde  $f_{\alpha}$  é o fator de forma que é um fator de correção que leva em conta que os fragmentos não são cubos perfeitos e  $d_{\alpha}$  é o  $d_{95}$  da fração, ou seja, o tamanho da abertura para o qual a fração é 95% passante.

$$M_{F_{\alpha\beta}} = v_{\alpha} \cdot \lambda_{\beta} = f_{\alpha} \cdot d_{\alpha}^3 \cdot \lambda_{\beta} \quad (2)$$

Como uma boa aproximação, pode-se escrever:

$$\sum_i (a_i - a_L)^2 \cdot M_i^2 = \sum_{\alpha} \sum_{\beta} N_{\alpha\beta} \cdot (a_{\alpha\beta} - a_L)^2 \cdot M_{F_{\alpha\beta}}^2 \quad (3)$$

Mas:

$$M_{F_{\alpha\beta}} = \frac{M_{L_{\alpha\beta}}}{N_{\alpha\beta}} \quad (4)$$

Logo:

$$\sum_i (a_i - a_L)^2 \cdot M_i^2 = \sum_{\alpha} \sum_{\beta} (a_{\alpha\beta} - a_L)^2 \cdot M_{F_{\alpha\beta}} \cdot M_{L_{\alpha\beta}} \quad (5)$$

Substituindo a Equação 2 na Equação 5:

$$\sum_i (a_i - a_L)^2 \cdot M_i^2 = \sum_{\alpha} v_{\alpha} \sum_{\beta} \lambda_{\beta} (a_{\alpha\beta} - a_L)^2 \cdot M_{L_{\alpha\beta}} \quad (6)$$

Dependendo do caso, podem ser usadas as equações 3, 5 ou 6 para calcular o fator constante de heterogeneidade constituinte  $IH_L$ . Se a equação 6 for usada, então:

$$IH_L = \sum_{\alpha} v_{\alpha} \sum_{\beta} \lambda_{\beta} \frac{(a_{\alpha\beta} - a_L)^2}{a_L^2} \cdot \frac{M_{L_{\alpha\beta}}}{M_L} \quad (7)$$

Esta é uma fórmula de referência válida, desde que é completa e relativamente simples.

Na prática, a variabilidade do volume dos fragmentos é muito mais importante do que a variabilidade na densidade, o que sugere uma simplificação ao considerar somente as frações

mais grossas. Além disso, sendo  $v_\alpha$  proporcional à terceira potência do diâmetro médio  $d_\alpha$  dos fragmentos de uma fração, é trivial que as frações mais grossas tenham maior influência no valor do  $IH_L$ , sendo assim:

$$(IH_L)_\alpha = \left(\frac{v_\alpha}{a_L^2 M_L}\right) \sum_{\beta} \lambda_{\beta} (a_{\alpha\beta} - a_L)^2 \cdot M_{L\alpha\beta} \quad (8)$$

$$IH_L \approx (IH_L)_{\alpha MAX} = \left(\frac{v_{\alpha MAX}}{a_L^2 M_L}\right) \sum_{\beta} \lambda_{\beta} (a_{\alpha MAX\beta} - a_L)^2 \cdot M_{L\alpha MAX\beta} \quad (9)$$

Contudo, e boa pratica e mais seguro considerar várias das frações consecutivas mais grossas, respectivamente,  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k, \dots, \alpha_n$ , sendo a fração mais fina. Obviamente, deve-se ter:

$$d_{\alpha_1} > d_{\alpha_2} > \dots > d_{\alpha_k}$$

Então calcula-se  $(IH_L)_{\alpha_1}, (IH_L)_{\alpha_2}$ , e assim sucessivamente. Como uma aproximação muito boa pode-se escrever:

$$IH_L = (IH_L)_{\alpha_1} + (IH_L)_{\alpha_2} + \dots + (IH_L)_{\alpha_k} \quad (10)$$

Em um grande número de casos práticos, observa-se que  $(IH_L)_{\alpha_1}$  é uma estimativa razoável de  $IH_L$ . Não devemos confundir as respectivas contribuições de  $(IH_L)_{\alpha_1}, (IH_L)_{\alpha_2}, \dots, (IH_L)_{\alpha_k}$  até  $IH_L$ , com o fator constante de heterogeneidade constituinte  $IH_{L\alpha}$  de uma dada fração  $\alpha$ , o qual é calculado pela Equação 11.

$$IH_{L\alpha} = \frac{v_\alpha}{a_\alpha M_\alpha} \sum_{\beta} \lambda_{\beta} (a_{\alpha\beta} - a_\alpha)^2 M_{L\alpha\beta} \quad (11)$$

E podemos fazer as duas hipóteses que seguem.

Primeira hipótese: A experiência mostra que o conteúdo crítico  $a_{\alpha\beta}$  normalmente varia muito mais de uma fração de determinada densidade para a outra do que de uma fração de determinado tamanho para a outra; portanto, todos os valores  $a_{\alpha\beta}$  podem ser substituídos pelo conteúdo crítico médio  $a_\beta$  da fração densidade  $L_\beta$ .

Segunda hipótese: O estudo de um largo número de casos reais mostra que as proporções  $M_{L\alpha\beta}/M_{L\beta}$  normalmente variam pouco de uma fração de determinada densidade para a outra;

portanto, podemos assumir que todos os valores  $M_{L\alpha\beta}/M_{L\beta}$  podem ser substituídos pelo sua média  $M_{L\alpha}/M_L$ . Assim, pode-se tomar como verdadeira a Equação 12.

$$M_{L\alpha\beta} = M_{L\beta} M_{L\alpha}/M_L \quad (12)$$

Portanto, pela transposição dessas hipóteses na Equação 7 e separando o termo em  $\alpha$  para aqueles em  $\beta$ , obtemos o  $IH_L$  na Equação 13.

$$IH_L = \left( \sum_{\alpha} \frac{v_{\alpha} M_{L\alpha}}{M_L} \right) \left( \sum_{\beta} \lambda_{\beta} \frac{(a_{\beta} - a_L)^2}{a_L^2} \cdot \frac{M_{L\beta}}{M_L} \right) \quad (13)$$

Por conveniência, podemos chamar o primeiro fator entre parênteses X e o segundo fator, Y:

$$IH_L = XY \quad (14)$$

Agora, deve-se estimar o fator X, relativo ao tamanho das partículas da fração, e o fator Y, relativo à densidade das partículas da fração.

Para calcular o fator X, considera-se conhecido o volume  $v_{\alpha}$  do lote  $L_{\alpha}$  que, como visto na Equação 1, é igual ao produto  $f_{\alpha} \cdot d_{\alpha}^3$ . O fator de forma  $f$  é obtido experimentalmente e é calculado por:

$$f_{\alpha} = M/pd_{\alpha}^3\lambda \quad (15)$$

Onde  $M$  é a massa dos fragmentos coletados,  $p$  é o número de fragmentos coletados,  $d_{\alpha}$  é o  $d_{95}$  da fração e  $\lambda$  a densidade média dos fragmentos.

O fator  $f$  é relativamente constante nas frações de diferentes tamanhos e o fator X pode ser escrito como:

$$X = f \sum_{\alpha} d_{\alpha}^3 M_{L\alpha}/M_L \quad (16)$$

Por conveniência, escreve-se o fator X como segue:

$$X = f \sum_{\alpha} d_{\alpha}^3 M_{L\alpha}/M_L = fg d^3 \quad (17)$$

Onde  $g$  é o fator granulometria.

Para o cálculo do fator Y, considera-se que Y é mínimo quando o material é homogêneo, ou seja, em um caso limite, quando o material é perfeitamente homogêneo,  $a_{\beta}$  é igual a  $a_L$ , logo,



$Y=0$ . Por outro lado, quando o material for composto de partículas completamente liberadas, por definição  $Y_{max} = c$ .

Portanto,  $Y$  assume algum valor dentro de  $0 \leq Y \leq c$ .

O fator de liberação  $l$  é um adimensional, sendo  $0 \leq l \leq 1$ . Quando o material é perfeitamente homogêneo não há liberação,  $l = 0$  e, quando o material é completamente liberado,  $l = 1$ . Escreve-se, então:

$$Y = cl \quad (18)$$

A partir da substituição dos fatores  $X$  e  $Y$  na Equação 14, o fator  $IH_L$  pode ser escrito conforme a Equação 19.

$$IH_L = clfgd^3 \quad (19)$$

onde  $c$  é o fator de mineralogia,  $l$ , o fator de liberação,  $f$ , o fator de forma,  $g$ , o fator de granulometria e  $d$  é o  $d_{95}$  da fração. Como os fatores que multiplicam o diâmetro das partículas são de difícil obtenção, pode utilizado o método experimental indicado por Pitard determinar  $IH_L$ .

### 3.4. ESTIMATIVA INDIRETA DO FATOR CONSTANTE DE HETEROGENEIDADE $IH_L$

Este método é recomendado em situações onde ocorrem dificuldades em estimar o fator constante de heterogeneidade constituinte  $IH_L$ . O método é baseado na hipótese de que o conteúdo crítico  $a_{\alpha\beta}$  de uma fração de determinado tamanho e densidade e a proporção  $M_{L\alpha\beta}/M_L$  desta fração de determinado tamanho-densidade no lote varia pouco com o tamanho dos fragmentos. O método consiste em extrair um certo número  $Q$  de fragmentos  $F_q$ , um por um aleatoriamente, da fração com maior tamanho do material em investigação. Para constituintes principais da amostra  $Q \geq 50$ , mas para elementos traço e metais preciosos em minérios,  $Q \geq 100$ . Deve-se medir o volume  $v_q$  dos  $Q$  fragmentos  $F_q$ . Com o peso seco destes  $Q$  fragmentos é obtido  $M_q$ . Deve-se fazer a análise individual dos  $Q$  fragmentos, o que dá os conteúdos críticos  $a_q$ ,  $b_q$ , etc. Deve-se, ainda, calcular a massa da batelada  $E_I$ , a partir de:

$$M_{E1} = \sum_q M_q \quad (20)$$

E, calcular a teor médio  $a_{E1}$  desta batelada:

$$a_{E1} = \frac{1}{M_{E1}} \sum_q a_q M_q \quad (21)$$

O que é a soma ponderada dos conteúdos individuais. Calcula-se, então, o estimador não enviesado  $EST.Y$  de  $Y$ , assumindo que cada fragmento é parte de uma classe de densidade bem definida:

$$EST.Y = \sum_q \frac{(a_q - a_{E1})^2}{v q a_{E1}^2} \frac{M_q^2}{M_{E1}} \quad (22)$$

Pode-se observar que o volume médio de um fragmento  $\bar{v}$  é:

$$\bar{v} = \frac{1}{Q} \sum_q v_q \quad (23)$$

O qual é um bom estimador do produto  $\bar{v}d^3$ , e  $g\bar{v}$  um bom estimador de  $X$  na equação  $IH_L = XY$ . Logo:

$$EST.IH_L = \bar{v}g.(EST.Y) \quad (24)$$

Em grande parte das vezes, um protocolo de amostragem precisa de estágios iniciais de cominuição; consequentemente, pode-se repetir este experimento para um ou dois tamanhos de fragmentos. Quando o tamanho de fragmento se torna menor, deverão ser analisados  $Q$  pequenos grupos de  $p$  fragmentos. Todos os fragmentos são coletados aleatoriamente, um por um, e  $p$  deve ser menor quando comparado com o número total de fragmentos  $n$  presente na batelada a qual se está trabalhando. Sendo:

$$n > 10Qp \quad (25)$$

Após simplificações da Equação 24, utilizando as Equações 22 e 23, obtemos a expressão da Equação 26.

$$EST.IH_L = g \sum_q \frac{(a_q - a_{E1})^2}{a_{E1}^2} \frac{M_q^2}{M_{E1}} \quad (26)$$

onde  $g$  é o fator de calibração,  $M_q$  é a massa de cada grupo de  $Q$  fragmentos,  $a_q$  é o teor do grupo,  $M_{E1}$  é o somatório das massas  $M_q$  e  $a_{E1}$  é o teor médio, calculados pelas Equações 20 e 21, respectivamente.

A partir dos resultados do teste de heterogeneidade, é possível relacionar, em um gráfico di-log, o diâmetro nominal de cada fração granulométrica com o fator constante de heterogeneidade  $EST.IH_L$  (PITARD, 1993).

Os diâmetros nominais das frações devem ser calculados com base na Equação 27 (KOYAMA, 2010).

$$d = \sqrt[3]{\frac{d_1^3 + d_2^3}{2}} \quad (27)$$

onde  $d_1$  e  $d_2$  são as aberturas das malhas utilizadas no peneiramento da fração.

O gráfico obtido deve ser representado pela Equação 28.

$$EST.IH_L = k \cdot d^\alpha \quad (28)$$

Onde  $k$  e  $\alpha$  são as constantes de amostragem e indicam a heterogeneidade do minério. Quanto maiores os valores de  $k$  e  $\alpha$ , maior a heterogeneidade do minério.

### 3.5. OTIMIZAÇÃO DE PROTOCOLOS DE AMOSTRAGEM

Um protocolo de amostragem é um processo que deve ser bem definido e integra todas as etapas para a amostragem de um lote, desde a amostragem primária até a análise química, envolvendo um ou mais estágios de coleta de amostra, cominuição e quarteamento.

Para encontrar o desvio padrão total do protocolo de amostragem, calcula-se, primeiramente, as variâncias relativas à cada etapa do protocolo de amostragem. Somam-se as variâncias e, com a variância total, calcula-se o desvio padrão total, a partir da Equação 30.

A variância do erro fundamental é calculada pela Equação 29.  $M_s$  é a massa da amostra e  $M_L$  é a massa do lote. O desvio padrão relativo é dado pela Equação 30.

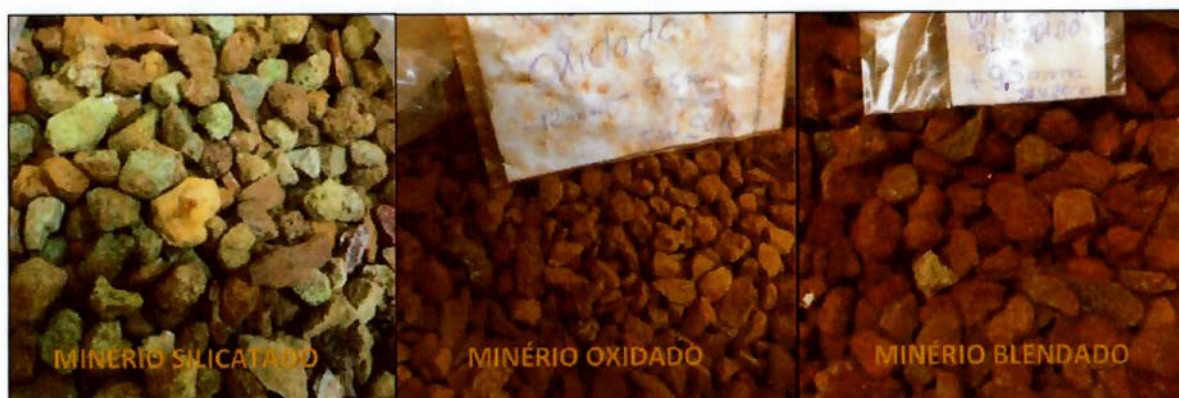
$$s_{FSE}^2 = IH_L \times \left( \frac{1}{M_s} - \frac{1}{M_L} \right) \quad (29)$$

$$s_{FSE_{rel}} = \sqrt{s_{FSE}^2} \quad (30)$$

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

O Teste de Heterogeneidade foi realizado em três diferentes amostras de minério de níquel da Unidade de Niquelândia da Votorantim, sendo elas do minério silicatado, oxidado e blendado, conforme Figura 1. O minério blendado é obtido a partir de uma mistura dos minérios oxidado e silicatado.

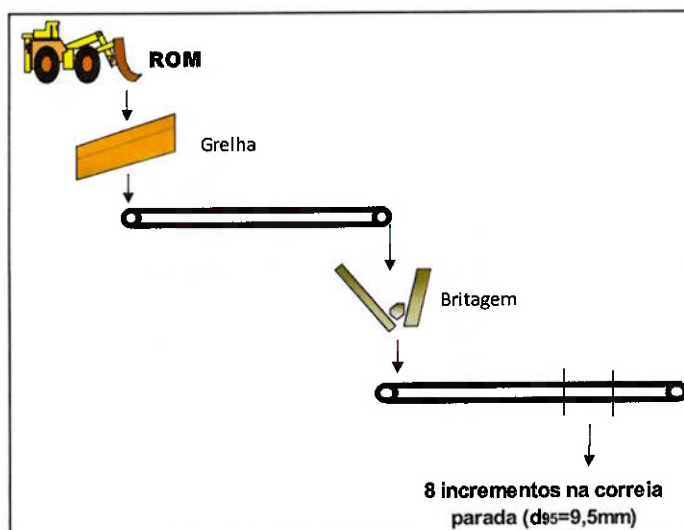
Figura 1 - Amostras de minério de níquel utilizadas no teste



Fonte: Elaboração própria.

No teste, utilizou-se amostras de 400 kg de cada tipo de minério, as quais foram submetidas a peneiramentos com abertura 9,50 mm, 6,35 mm, 4,75 mm e 3,35 mm. As frações usadas no teste estão contidas na Tabela 1. O material utilizado no teste foi amostrado na correia após uma etapa de britagem, e possui granulometria abaixo de 9,5 mm. Foram retirados 8 incrementos com a correia parada.

Figura 2: Fluxograma de coleta de amostras para o teste



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 1 - Frações utilizadas para realização do teste em cada tipo de minério

Fração	Abertura (mm)
Fina	-4,75 + 3,35 mm
Intermediária	-6,35 + 4,75 mm
Grossa	-9,50 + 6,35 mm

Construiu-se uma malha quadriculada com quadrados internos dotados de uma área de 10 cm<sup>2</sup> sobre duas mesas, sendo que uma das mesas possuía um total de 360 quadrados menores e a outra, 384 quadrados.

Cada uma das frações foi distribuída em forma de pilha, para que as partículas fossem dispostas de uma maneira mais homogênea sobre a mesa. As partículas foram espalhadas manualmente até que fosse obtida uma monocamada que cobrisse toda a área dos quadrados. Idealmente, cada partícula deverá ter equiprobabilidade de ser escolhida ao longo do teste.

A fração fina foi espalhada sobre duas mesas e dividida em todos os 744 quadrados de lado 10 cm, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Fração fina



Fonte: Elaboração própria.

A fração intermediária foi dividida em 384 quadrados de lado 10 cm (Figura 4).



Figura 4 - fração intermediária



Fonte: Elaboração própria.

A fração grossa foi dividida em 96 quadrados de lado 20 cm, conforme a Figura 5.

Figura 5 - Fração grossa



Fonte: Elaboração própria.

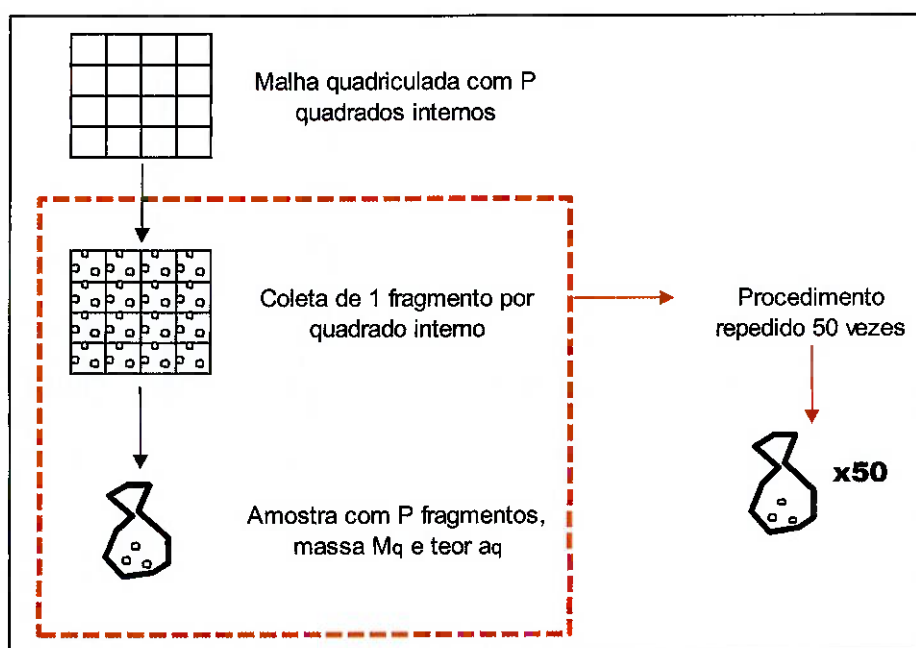
Selecionou-se somente uma partícula de cada quadrado, de modo aleatório. Ao final desta coleta em toda a malha obteve-se um conjunto de  $P$  partículas, que possuem em conjunto uma massa  $M_q$  e teor médio  $a_q$ . Garantiu-se que  $M_q \geq 50g$ , para que fosse possível análise química de teor, a qual exige esta massa mínima.

Foram geradas, pela repetição do processo descrito acima, 50 amostras de 744 fragmentos da fração fina, 50 amostras de 384 fragmentos da fração intermediária e 50 amostras de 96 fragmentos da fração grossa, para cada tipo de minério, as quais foram individualmente pesadas e analisadas quimicamente. A descrição completa da quantidade  $P$  de quadrados internos (sendo  $P$  o mesmo número de fragmentos coletados em cada amostra) da malha utilizada em cada fração e do número de amostras geradas se encontram na Tabela 2; o esquema simplificado do teste de heterogeneidade, na Figura 6.

Tabela 2 - Número de quadrados internos da malha e fragmentos por amostra

Fração	Número de quadrados internos e fragmentos $P$ por amostra	Número de amostras geradas de cada tipo de minério
Fina	744	50
Intermediária	384	50
Grossa	96	50

Figura 6 - Esquema do teste de heterogeneidade



Fonte: Elaboração própria.

As amostras geradas no teste foram pesadas, obtendo-se a massa  $M_q$  de cada conjunto de fragmentos, e foi feita a análise química do teor de níquel, obtendo-se  $a_q$  de cada grupo de fragmentos.

Os resultados detalhados da análise química das amostras dos minérios silicatado, oxidado e blendado estão contidos no Apêndice.



## 5. DESCRIÇÃO DA MINERAÇÃO ESTUDADA

O minério de níquel usado no presente estudo provém da Unidade de Niquelândia, no Estado de Goiás, Brasil, da Votorantim Metais. A mina se encontra na província mineral dos Maciços Máficos - Ultramáficos do Noroeste de Minas, Centro de Goiás e Tocantins (LIMA, 1997). No que diz respeito à metalogenia de formação, o depósito do município de Niquelândia é do tipo laterítico, o qual se relaciona com o enriquecimento supergênico e ocorre em ambientes derivados do intemperismo de rochas ultramáficas e rochas ultrabásicas (FARIAS, 2009).

A Unidade de Niquelândia encontra-se com suas atividades suspensas desde janeiro de 2016, devido à queda de 40% no preço do níquel, somente no ano de 2015, em relação ao mesmo período no ano anterior. A Figura 7 ilustra a planta de beneficiamento da Unidade de Niquelândia.

Figura 7 - Planta da Unidade Niquelândia - Votorantim Metais



Fonte: VOTORANTIM, 2014.

A Figura 8 mostra a correia que alimenta os moinhos da Usina de beneficiamento, com minério já processado pelo circuito completo de britagem. No caso da imagem, a correia transporta minério de níquel blendado e de granulometria mais fina do que aquele utilizado no teste, o qual passou apenas pela etapa de britagem primária.

Figura 8 - Correia de alimentação da usina (material blendado)



Fonte: Imagem cedida pela Profa. Dra. Ana Carolina Chierigati.

Após a lavra do minério, o processo de secagem é realizado com o uso de energia solar. Para este fim, são utilizados seis tratores agrícolas, cada um com uma dupla de operadores trabalhando em regime de revezamento de turno. O minério é disposto em um estoque (Figura 9), composto por camadas de material provenientes do ROM (*Run Of Mine*). Forma-se uma camada delgada com espessura de 30 cm, e o minério é fragmentado de acordo com o atrito promovido pelos equipamentos, aumentando a superfície de contato com o ar e sol, o que acelera a secagem. (VOTORANTIM, 2014)

Figura 9 - Estoque onde é feita a amostragem manual

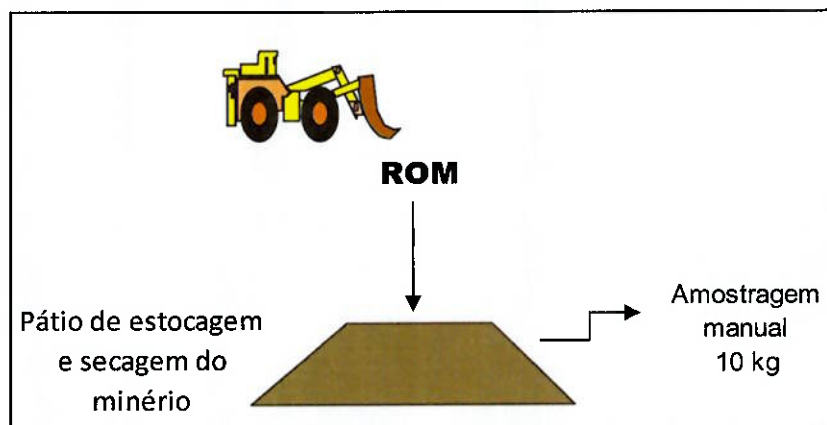


Fonte: Imagem cedida pela Profa. Dra. Ana Carolina Chieregati.

A amostragem do minério de níquel é feita manualmente neste pátio de estocagem de minério grosseiro, conforme a Figura 10. Os fragmentos são coletados manualmente pelo operador.

O material presente no estoque é material ROM e não passou por nenhuma etapa de beneficiamento.

Figura 10: Retirada da amostra primária



Fonte: Elaboração própria.

## 6. RESULTADOS OBTIDOS

Com base nos resultados de análise química e pesagem dos 50 grupos de amostras das frações granulométricas de cada minério, é possível estimar o valor do fator de heterogeneidade constitucional  $EST.IH_L$ , dado pela Equação 26.

Os diâmetros nominais das frações utilizadas no teste e o  $IH_L$  de cada fração e minério correspondente, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 -  $IH_L$  em função dos diâmetros nominais das frações

Fração (mm)	Diâmetro nominal (cm)	$IH_L$ – Minério Silicatado	$IH_L$ – Minério Oxidado	$IH_L$ – Minério Blendado
-4,75+3,35 mm	0,417	0,0636	0,0405	0,0675
6,35+4,75 mm	0,566	0,146	0,0673	0,135
9,5+6,35 mm	0,823	0,894	0,725	0,903

O gráfico de  $EST.IHL$  versus o diâmetro nominal de cada minério são representados nas Figuras 11, 12 e 13. A partir destes gráficos, pode-se obter uma fórmula prática para o cálculo do fator constante de heterogeneidade constitucional de cada um dos minérios.

Figura 11 -  $IH_L$  em função do diâmetro nominal do fragmento - Minério Silicatado

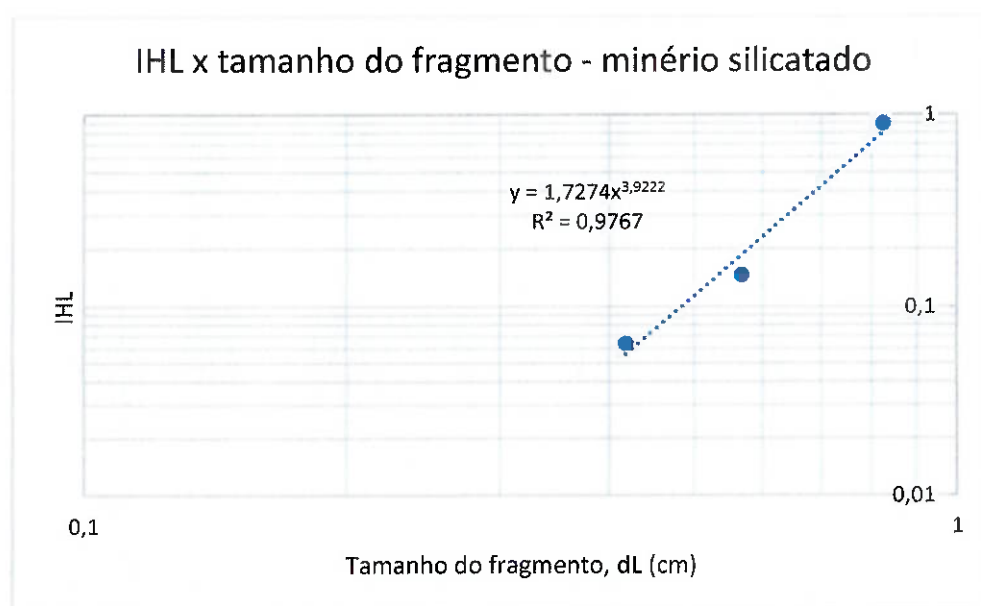


Figura 12 -  $IHL_L$  em função do diâmetro nominal do fragmento - Minério Oxidado

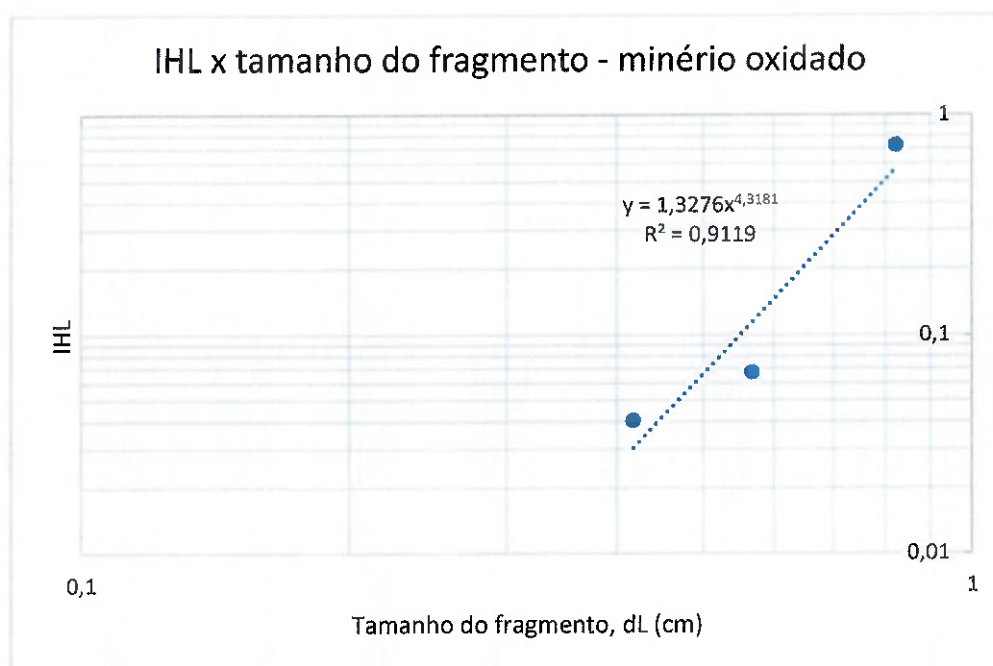
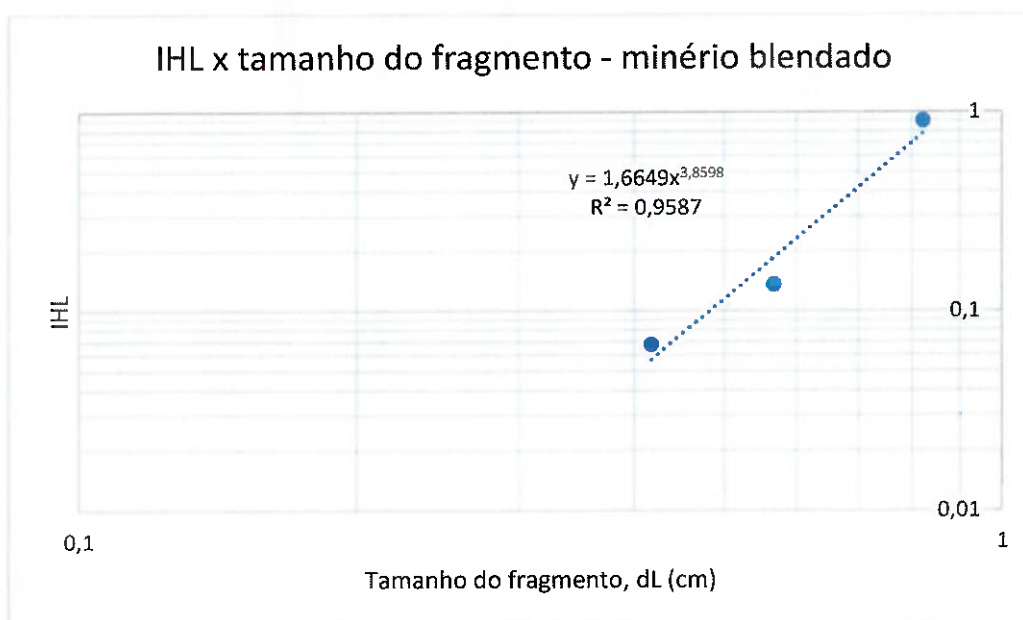


Figura 13 -  $IHL_L$  em função do diâmetro nominal do fragmento - Minério Blendado



As fórmulas obtidas pelos gráficos expressam as heterogeneidades dos minérios silicatado (Equação 29), oxidado (Equação 30) e blendado (Equação 31).

$$EST.IH_L = 1,7274d^{3,9222} \quad (31)$$

$$EST.IH_L = 1,3276d^{4,3181} \quad (32)$$

$$EST.IH_L = 1,6649d^{3,8598} \quad (33)$$

O diâmetro nominal aparece como variável única da equação, o que permite utilizar as equações de *EST.IHL* obtidas a partir dos gráficos para o cálculo do  $IH_L$  das etapas contidas nos protocolos de amostragem.

O resultado de *EST.IHL* obtido a partir do estudo das amostras se aproxima do fator constante de heterogeneidade constituinte  $IH_L$  determinado através de  $IH_L = clfgd^3$ . O fator d, segundo tal equação, é elevado a 3. Nas equações encontradas no método indireto sugerido por Pitard, o diâmetro nominal é elevado por valores razoavelmente próximos de 3.



## 7. DISCUSSÃO

A fim de se realizar a análise do protocolo de amostragem, será quantificado o desvio padrão gerado em cada uma de suas etapas.

### 7.1. PROTOCOLO ATUAL DE AMOSTRAGEM

O protocolo atual de amostragem é composto de uma etapa inicial de amostragem, britagem, quarteamento, pulverização e seleção de uma amostra analítica. Na amostragem primária, são coletados 10 kg, através da retirada manual de fragmentos. O lote inicial consiste de um pátio de estocagem de 100 toneladas de minério, sendo o diâmetro nominal  $d_{95}$  igual a 5 cm. Após isso, esta amostra de 10 kg passa por britagem e seu diâmetro nominal final passa a ser  $d_{95}=0,2$  cm. É feito um quarteamento, onde uma alíquota de 250 g são retirados e este passa por uma etapa de pulverização, após a qual o novo  $d_{95}$  é 0,0149 cm. A partir da amostra pulverizada de 250 g, faz-se uma seleção de uma amostra analítica de 0,8 g.

Figura 14 - Fluxograma simplificado do protocolo atual de amostragem



Nas Tabelas 4, 5 e 6, estão indicados todos os processos envolvidos no protocolo atual de amostragem.

A partir da soma das variâncias, calculadas pela Equação 29, e do cálculo do desvio padrão relativo, Equação 30, obtém-se o desvio padrão relativo total do protocolo de amostragem, indicado por  $TOTAL_{(s_{FSE}^2)}$ .

A etapa crítica dos protocolos de amostragem está indicada nas Tabelas 4, 5 e 6, consistindo na etapa de amostragem primária, com desvio padrão relativo maior que o recomendado por Pitard, o qual deverá ser menor que 10%.

Tabela 4 - Protocolo atual – minério silicatado

Protocolo atual - minério silicatado						
Estágio	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$d_N$ (cm)	$IH_L$ (g)	var. rel. ( $s^2_{FSE}$ )	desv. rel. ( $s_{FSE\ rel}$ )
1. Amostragem primária	100.000.000	10.000	5,0	952,6	0,095247	30,86%
2. Britagem	10.000	10.000	0,2	0,0031	0,000000	0,00%
3. Quarteamento	10.000	250	0,2	0,0031	0,000012	0,35%
4. Pulverização	250	250	0,0149	0,0000001	0,000000	0,00%
5. Seleção da amostra analítica	250	0,8	0,0149	0,0000001	0,000000	0,04%
TOTAL ( $s^2_{FSE}$ )					0,095259	30,86%

Tabela 5 - Protocolo atual - minério oxidado

Protocolo atual - minério oxidado						
Estágio	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$d_N$ (cm)	$IH_L$ (g)	var. rel. ( $s^2_{FSE}$ )	desv. rel. ( $s_{FSE\ rel}$ )
1. Amostragem primária	100.000.000	10.000	5,0	1384,5	0,138435	37,21%
2. Britagem	10.000	10.000	0,2	0,0013	0,000000	0,00%
3. Quarteamento	10.000	250	0,2	0,0013	0,000005	0,22%
4. Pulverização	250	250	0,0149	0,00000002	0,000000	0,00%
5. Seleção da amostra analítica	250	0,8	0,0149	0,00000002	0,000000	0,01%
TOTAL ( $s^2_{FSE}$ )					0,138440	37,21%

Tabela 6 - Protocolo atual - minério blendado

Protocolo atual - minério blendado						
Estágio	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$d_N$ (cm)	$IH_L$ (g)	var. rel. ( $s^2_{FSE}$ )	desv. rel. ( $s_{FSE\ rel}$ )
1. Amostragem primária	100.000.000	10.000	5,0	830,4	0,083029	28,81%
2. Britagem	10.000	10.000	0,2	0,0033	0,000000	0,00%
3. Quarteamento	10.000	250	0,2	0,0033	0,000013	0,36%
4. Pulverização	250	250	0,0149	0,0000001	0,000000	0,00%
5. Seleção da amostra analítica	250	0,8	0,0149	0,0000001	0,000000	0,04%
TOTAL ( $s^2_{FSE}$ )					0,083042	28,82%

## 7.2. PROTOCOLO DE AMOSTRAGEM SUGERIDO

A fim de reduzir o desvio padrão relativo total, sugere-se coletar uma massa maior na etapa 1. *Amostragem primária* e adicionar uma nova etapa de britagem no protocolo de amostragem após a etapa de amostragem primária, a etapa 2. *Britagem primária*. Considera-se que a nova etapa de britagem tenha relação de redução igual a 4. Os protocolos de amostragem sugeridos para cada tipo de minério estão contidos nas Tabelas 7, 8 e 9.



No protocolo de amostragem do minério silicatado, sugere-se o aumento da massa na amostragem primária para 100 kg, e o desvio padrão total do erro fundamental cai para 9,76%, como explicitado na Tabela 7.

Tabela 7 - Protocolo sugerido - minério silicatado

Protocolo sugerido - minério silicatado						
Estágio	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$d_N$ (cm)	$IH_L$ (g)	var. rel. ( $s^2_{FSE}$ )	desv. rel. ( $s_{FSE\ rel}$ )
1. Amostragem primária	100.000.000	100.000	5,0	952,6	0,009516	<b>9,76%</b>
2. Britagem primária	100.000	100.000	1,25	4,14	0,000000	0,00%
3. Britagem	100.000	100.000	0,20	0,0031	0,000000	0,00%
4. Quarteamento	100.000	250	0,20	0,0031	0,000012	0,35%
5. Pulverização	250	250	0,0149	0,0000001	0,000000	0,00%
6. Seleção da amostra analítica	250	0,8	0,0149	0,0000001	0,000000	0,04%
<b>TOTAL (<math>s^2_{FSE}</math>)</b>					<b>0,009529</b>	<b>9,76%</b>

No protocolo de amostragem do minério oxidado, sugere-se o aumento da massa coletada na amostragem primária para 140 kg, e o desvio padrão total do erro fundamental cai para 9,94%, como explicitado na Tabela 8.

Tabela 8 - Protocolo sugerido - minério oxidado

Protocolo sugerido - minério oxidado						
Estágio	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$d_N$ (cm)	$IH_L$ (g)	var. rel. ( $s^2_{FSE}$ )	desv. rel. ( $s_{FSE\ rel}$ )
1. Amostragem primária	100.000.000	140.000	5,0	1384,5	0,009875	<b>9,94%</b>
2. Britagem primária	140.000	140.000	1,25	3,48	0,000000	0,00%
3. Britagem	140.000	140.000	0,20	0,0013	0,000000	0,00%
4. Quarteamento	140.000	250	0,20	0,0013	0,000005	0,23%
5. Pulverização	250	250	0,0149	0,00000002	0,000000	0,00%
6. Seleção da amostra analítica	250	0,8	0,0149	0,00000002	0,000000	0,01%
<b>TOTAL (<math>s^2_{FSE}</math>)</b>					<b>0,009880</b>	<b>9,94%</b>

No protocolo de amostragem do minério blendado, sugere-se o aumento da massa coletada na amostragem primária para 100 kg, e o desvio padrão total do erro fundamental cai para 9,12%, como explicitado na Tabela 9.

Tabela 9 - Protocolo sugerido - minério blendado

Protocolo sugerido - minério blendado						
Estágio	Massa inicial (g)	Massa final (g)	$d_N$ (cm)	$IH_L$ (g)	var. rel. ( $s^2_{FSE}$ )	desv. rel. ( $s_{FSE\ rel}$ )
1. Amostragem primária	100.000.000	100.000	5,0	830,4	0,008295	<b>9,11%</b>
2. Britagem primária	100.000	100.000	1,25	3,94	0,000000	0,00%
3. Britagem	100.000	100.000	0,20	0,0033	0,000000	0,00%
4. Quarteamento	100.000	250	0,20	0,0033	0,000013	0,36%
5. Pulverização	250	250	0,0149	0,0000001	0,000000	0,00%
6. Seleção da amostra analítica	250	0,8	0,0149	0,0000001	0,000000	0,04%
<b>TOTAL (<math>s^2_{FSE}</math>)</b>					<b>0,008309</b>	<b>9,12%</b>

Como pode ser visto nas Tabelas 7, 8 e 9, aumentando a massa coletada na amostra primária é possível reduzir significativamente o desvio do erro fundamental de amostragem. Insere-se uma etapa de britagem primária por conta do maior volume de material alimentado para a análise química, e esta etapa não acrescenta desvio ao protocolo de amostragem (na Equação 29, pode-se observar que quando a massa amostrada é igual à massa do lote, a variância do erro fundamental é igual a zero).

A amostragem primária é feita manualmente no pátio de estocagem e aumentar a massa é possível através da coleta de um maior número de fragmentos.

A título de comparação da estimativa do  $IH_L$  pelo método indireto e pela Fórmula de Gy, ao fazer a determinação do  $IH_L$  pela Fórmula de Gy  $IH_L = clfgd^3$  e cálculo das massas mínimas pela Equação 29, foram obtidas as massas mínimas presentes na Tabela 10. Considera-se que o desvio padrão do erro fundamental seja igual a 10%, a densidade da garnierita igual a 2,5 t/m<sup>3</sup>,  $g=0,25$  (material não calibrado),  $l=0,2$  (material de liberação mediana) e  $f=0,5$ .

Tabela 10: Massas mínimas obtidas pela Fórmula de Gy

Tipo de Minério	Massa (g)
Minério Silicatado	40446
Minério Oxidado	85348
Minério Blendado	54822

Portanto, devido à dificuldade de estimativa do fator de liberação  $l$ , o cálculo do fator  $IH_L$  pela Fórmula de Gy subestima os valores das massas mínimas necessárias à amostragem.

## 8. CONCLUSÕES

A partir do presente estudo, percebe-se que, através da quantificação da heterogeneidade intrínseca do minério pelo teste de heterogeneidade, método prático proposto por Pitard (1993), e análise dos dados dele obtidos, é possível definir modificações no protocolo de amostragem e minimizar os desvios do erro fundamental de amostragem.

Observa-se que, incluindo uma etapa de britagem e aumentando a massa da amostra primária para 100 kg (minérios silicatado e blendado) e 140 kg (minério oxidado), reduz-se de modo significativo o desvio do erro fundamental dos protocolos, garantindo que o mesmo atinja valores aceitáveis e que a amostra coletada seja representativa do lote inicial.

Obviamente, melhorias no processo geralmente não acontecem sem algum custo. Entretanto, tais custos, provenientes do aumento de massa processada e da inclusão de etapa de britagem no laboratório físico, são compensados pela garantia da representatividade das amostras e pelo aumento na confiabilidade das estimativas de teor em todas as etapas da operação.

O aumento da massa amostrada pode ser feito a partir da coleta de um maior número de fragmentos na pilha, procedimento que pode tornar necessário um novo método de transporte do material até o laboratório. A inclusão de uma etapa de britagem primária é necessária devido ao maior volume de minério alimentado para a análise química e deve contar com um novo britador para este fim.

Para que uma amostra seja representativa do lote do qual foi retirada, o procedimento de coleta deve ser correto (eliminando os erros sistemáticos) e o desvio padrão do erro fundamental de amostragem deve ser suficientemente baixo (minimizando os erros aleatórios). Pitard (2009) faz as seguintes recomendações para os desvios máximos do erro fundamental:

1. Em nenhuma circunstância  $s(SFE)$  deve ser maior que 16% relativo, visto que, acima deste valor, deixamos o domínio da normalidade e lentamente entramos no domínio de processos de Poisson. Todas as fórmulas apresentadas na teoria de amostragem não valem para processos de Poisson.

2. Para as fases de exploração e controle de teores de metais preciosos, para a determinação de elementos traços e para a amostragem ambiental, sugere-se um valor relativo máximo de  $s(FSE)$  de 16%.

3. Para as fases de exploração e controle de teores de metais base e para o controle de processos em geral, sugere-se um valor relativo máximo de  $s(FSE)$  de 10%.

4. Para balanços de massas ou metalúrgicos, sugere-se um valor relativo máximo de  $s(FSE)$  entre 5% e 7%.

Visto que o processo de amostragem apresentado neste trabalho é destinado ao controle de teores de minério de níquel, um metal base, a recomendação é que o valor relativo máximo do erro fundamental de amostragem seja 10%.

Portanto, os testes de heterogeneidade permitiram definir as etapas críticas do protocolo de amostragem da Votorantim Níquel e otimizá-lo com mudanças simples e factíveis no processo. A otimização proposta permitirá à operação diminuir as incertezas das estimativas de teor, aumentando a confiabilidade nos resultados usados para o planejamento mineiro, para o controle de processos e para a reconciliação de teores.

## REFERÊNCIAS

- CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios: manuseio de sólidos granulados**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 384 p.
- CHIEREGATI, A.C. **Reconciliação pró-ativa em empreendimentos mineiros**. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2007. 201 p.
- FARIAS, J. O. G. **Relatório Técnico 24 – Perfil da Mineração do Níquel**. Ministério de Minas e Energia – MME. 2009.
- GY, P. **Sampling for analytical purposes**. 2<sup>nd</sup> ed., traduzido por A. G. Royle, John Wiley & Sons. West Sussex, Inglaterra: Wiley, 1998.
- KOYAMA, I. K. ; CHIEREGATI, A. C. ; ESTON, S. M. Teste de heterogeneidade como método de otimização de protocolos de amostragem. **Brasil Mineral**, São Paulo, v. 27, p. 63-68, 2010.
- LIMA, T. M. **Geologia, estratigrafia e petrologia da porção sul do complexo máfico-ultramáfico de cana brava, Goiás**. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, 1997. 294 p.
- PITARD, F. F. **Pierre Gy's sampling theory and sampling practice: heterogeneity, sampling correctness, and statistical process control**. 2ª ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1993.
- PITARD, F.F. 2009. **Pierre Gy's sampling theory and C.O. Ingamells' poisson process approach**. Doctoral thesis, Aalborg University, Esbjerg, Dinamarca, 309 p.
- VOTORANTIM METAIS. 2014. **Unidade Niquelândia da Votorantim Metais intensifica extração de minério de níquel**. Disponível em: <<http://www.vmetais.com.br/>>. Acessado em: 15 de setembro de 2016.

## APÊNDICE

## RESULTADOS DA ANÁLISE DE TEOR DE NÍQUEL – MINÉRIO SILICATADO

Amostra	Fração -4,75+3,35 mm			-6,35+4,75 mm			-9,50+6,35 mm		
	ID	Massa (g)	Ni (%)	ID	Massa (g)	Ni (%)	ID	Massa (g)	Ni (%)
1	TH 301	50,82	2,20	TH 401	68,69	2,17	TH 601	54,90	1,42
2	TH 302	54,80	2,27	TH 402	66,99	1,98	TH 602	60,22	1,73
3	TH 303	60,75	2,16	TH 403	65,18	2,16	TH 603	66,67	1,34
4	TH 304	58,71	2,19	TH 404	65,98	1,99	TH 604	62,28	1,82
5	TH 305	58,61	2,29	TH 405	62,71	2,11	TH 605	48,99	1,55
6	TH 306	51,95	2,27	TH 406	65,49	2,30	TH 606	62,77	1,95
7	TH 307	59,30	2,46	TH 407	69,77	2,04	TH 607	61,08	1,50
8	TH 308	52,35	2,16	TH 408	69,93	2,29	TH 608	68,04	1,44
9	TH 309	51,62	2,05	TH 409	75,49	1,75	TH 609	56,51	1,39
10	TH 310	56,98	2,12	TH 410	74,35	1,92	TH 610	66,59	1,58
11	TH 311	50,01	2,22	TH 411	77,48	1,93	TH 611	60,42	2,07
12	TH 312	61,05	2,12	TH 412	69,41	2,02	TH 612	59,91	1,45
13	TH 313	51,22	2,10	TH 413	61,85	2,05	TH 613	54,72	1,77
14	TH 314	61,28	2,24	TH 414	62,97	2,20	TH 614	61,23	1,31
15	TH 315	50,53	2,12	TH 415	61,74	2,01	TH 615	55,64	1,70
16	TH 316	56,47	2,04	TH 416	63,24	2,29	TH 616	56,16	1,84
17	TH 317	53,35	1,99	TH 417	64,53	2,01	TH 617	55,71	1,60
18	TH 318	52,32	2,03	TH 418	61,05	2,19	TH 618	56,63	1,81
19	TH 319	51,11	2,37	TH 419	66,51	1,98	TH 619	55,69	1,33
20	TH 320	61,49	2,07	TH 420	59,07	2,05	TH 620	56,74	1,51
21	TH 321	50,66	2,09	TH 421	73,43	2,30	TH 621	54,13	1,57
22	TH 322	58,96	2,24	TH 422	83,20	1,88	TH 622	52,37	1,64
23	TH 323	55,44	2,16	TH 423	81,35	2,07	TH 623	54,30	1,81
24	TH 324	52,95	2,01	TH 424	62,80	2,01	TH 624	51,62	0,98
25	TH 325	53,59	2,22	TH 425	72,75	2,10	TH 625	50,92	2,13
26	TH 326	52,98	2,07	TH 426	59,97	2,01	TH 626	68,32	1,16
27	TH 327	56,52	2,20	TH 427	75,64	2,13	TH 627	58,11	1,36
28	TH 328	52,87	2,10	TH 428	61,07	2,18	TH 628	53,63	2,01
29	TH 329	51,71	2,28	TH 429	58,58	1,97	TH 629	57,19	1,60
30	TH 330	52,71	2,15	TH 430	62,17	1,89	TH 630	61,09	1,15
31	TH 331	53,67	2,16	TH 431	60,06	2,07	TH 631	50,52	1,56
32	TH 332	59,25	2,17	TH 432	59,43	2,02	TH 632	64,28	1,21
33	TH 333	50,34	2,14	TH 433	63,48	2,16	TH 633	53,83	1,56
34	TH 334	58,00	2,30	TH 434	62,53	2,08	TH 634	57,22	1,30
35	TH 335	49,34	2,33	TH 435	60,14	1,91	TH 635	55,87	1,55
36	TH 336	49,52	2,18	TH 436	73,70	1,98	TH 636	59,47	2,01
37	TH 337	57,46	2,19	TH 437	75,56	2,14	TH 637	54,99	1,77
38	TH 338	50,64	2,23	TH 438	76,01	2,15	TH 638	65,32	1,76
39	TH 339	51,43	2,11	TH 439	77,19	2,14	TH 639	63,09	1,29
40	TH 340	58,82	2,06	TH 440	79,67	2,15	TH 640	53,80	1,75
41	TH 341	54,77	2,19	TH 441	80,52	1,85	TH 641	81,69	1,52
42	TH 342	59,39	2,15	TH 442	57,20	1,94	TH 642	73,76	1,52
43	TH 343	51,66	2,18	TH 443	57,81	2,05	TH 643	71,16	1,87
44	TH 344	57,91	2,26	TH 444	59,40	2,21	TH 644	75,29	1,33
45	TH 345	53,37	2,14	TH 445	62,57	1,80	TH 645	81,41	1,23
46	TH 346	59,86	2,07	TH 446	58,64	2,06	TH 646	73,52	1,25
47	TH 347	51,74	2,27	TH 447	65,61	1,98	TH 647	78,42	1,59
48	TH 348	52,53	2,31	TH 448	60,94	1,90	TH 648	64,81	1,81
49	TH 349	65,93	2,01	TH 449	60,12	2,09	TH 649	68,27	1,37
50	TH 350	57,72	2,09	TH 450	59,97	2,10	TH 650	71,20	1,65



## RESULTADOS DA ANÁLISE DE TEOR DE NÍQUEL – MINÉRIO OXIDADO

Amostra	Fração								
	-4,75+3,35 mm			-6,35+4,75 mm			-9,50+6,35 mm		
	ID	Massa (g)	Ni (%)	ID	Massa (g)	Ni (%)	ID	Massa (g)	Ni (%)
1	TH 301	50,82	2,20	TH 401	68,69	2,17	TH 601	54,90	1,42
2	TH 302	54,80	2,27	TH 402	66,99	1,98	TH 602	60,22	1,73
3	TH 303	60,75	2,16	TH 403	65,18	2,16	TH 603	66,67	1,34
4	TH 304	58,71	2,19	TH 404	65,98	1,99	TH 604	62,28	1,82
5	TH 305	58,61	2,29	TH 405	62,71	2,11	TH 605	48,99	1,55
6	TH 306	51,95	2,27	TH 406	65,49	2,30	TH 606	62,77	1,95
7	TH 307	59,30	2,46	TH 407	69,77	2,04	TH 607	61,08	1,50
8	TH 308	52,35	2,16	TH 408	69,93	2,29	TH 608	68,04	1,44
9	TH 309	51,62	2,05	TH 409	75,49	1,75	TH 609	56,51	1,39
10	TH 310	56,98	2,12	TH 410	74,35	1,92	TH 610	66,59	1,58
11	TH 311	50,01	2,22	TH 411	77,48	1,93	TH 611	60,42	2,07
12	TH 312	61,05	2,12	TH 412	69,41	2,02	TH 612	59,91	1,45
13	TH 313	51,22	2,10	TH 413	61,85	2,05	TH 613	54,72	1,77
14	TH 314	61,28	2,24	TH 414	62,97	2,20	TH 614	61,23	1,31
15	TH 315	50,53	2,12	TH 415	61,74	2,01	TH 615	55,64	1,70
16	TH 316	56,47	2,04	TH 416	63,24	2,29	TH 616	56,16	1,84
17	TH 317	53,35	1,99	TH 417	64,53	2,01	TH 617	55,71	1,60
18	TH 318	52,32	2,03	TH 418	61,05	2,19	TH 618	56,63	1,81
19	TH 319	51,11	2,37	TH 419	66,51	1,98	TH 619	55,69	1,33
20	TH 320	61,49	2,07	TH 420	59,07	2,05	TH 620	56,74	1,51
21	TH 321	50,66	2,09	TH 421	73,43	2,30	TH 621	54,13	1,57
22	TH 322	58,96	2,24	TH 422	83,20	1,88	TH 622	52,37	1,64
23	TH 323	55,44	2,16	TH 423	81,35	2,07	TH 623	54,30	1,81
24	TH 324	52,95	2,01	TH 424	62,80	2,01	TH 624	51,62	0,98
25	TH 325	53,59	2,22	TH 425	72,75	2,10	TH 625	50,92	2,13
26	TH 326	52,98	2,07	TH 426	59,97	2,01	TH 626	68,32	1,16
27	TH 327	56,52	2,20	TH 427	75,64	2,13	TH 627	58,11	1,36
28	TH 328	52,87	2,10	TH 428	61,07	2,18	TH 628	53,63	2,01
29	TH 329	51,71	2,28	TH 429	58,58	1,97	TH 629	57,19	1,60
30	TH 330	52,71	2,15	TH 430	62,17	1,89	TH 630	61,09	1,15
31	TH 331	53,67	2,16	TH 431	60,06	2,07	TH 631	50,52	1,56
32	TH 332	59,25	2,17	TH 432	59,43	2,02	TH 632	64,28	1,21
33	TH 333	50,34	2,14	TH 433	63,48	2,16	TH 633	53,83	1,56
34	TH 334	58,00	2,30	TH 434	62,53	2,08	TH 634	57,22	1,30
35	TH 335	49,34	2,33	TH 435	60,14	1,91	TH 635	55,87	1,55
36	TH 336	49,52	2,18	TH 436	73,70	1,98	TH 636	59,47	2,01
37	TH 337	57,46	2,19	TH 437	75,56	2,14	TH 637	54,99	1,77
38	TH 338	50,64	2,23	TH 438	76,01	2,15	TH 638	65,32	1,76
39	TH 339	51,43	2,11	TH 439	77,19	2,14	TH 639	63,09	1,29
40	TH 340	58,82	2,06	TH 440	79,67	2,15	TH 640	53,80	1,75
41	TH 341	54,77	2,19	TH 441	80,52	1,85	TH 641	81,69	1,52
42	TH 342	59,39	2,15	TH 442	57,20	1,94	TH 642	73,76	1,52
43	TH 343	51,66	2,18	TH 443	57,81	2,05	TH 643	71,16	1,87
44	TH 344	57,91	2,26	TH 444	59,40	2,21	TH 644	75,29	1,33
45	TH 345	53,37	2,14	TH 445	62,57	1,80	TH 645	81,41	1,23
46	TH 346	59,86	2,07	TH 446	58,64	2,06	TH 646	73,52	1,25
47	TH 347	51,74	2,27	TH 447	65,61	1,98	TH 647	78,42	1,59
48	TH 348	52,53	2,31	TH 448	60,94	1,90	TH 648	64,81	1,81
49	TH 349	65,93	2,01	TH 449	60,12	2,09	TH 649	68,27	1,37
50	TH 350	57,72	2,09	TH 450	59,97	2,10	TH 650	71,20	1,65

## RESULTADOS DA ANÁLISE DE TEOR DE NÍQUEL – MINÉRIO BLENDADO

Amostra	Fração								
	-4,75+3,35 mm			-6,35+4,75 mm			-9,50+6,35 mm		
	ID	Massa (g)	Ni (%)	ID	Massa (g)	Ni (%)	ID	Massa (g)	Ni (%)
1	TH 301	50,82	2,20	TH 401	68,69	2,17	TH 601	54,90	1,42
2	TH 302	54,80	2,27	TH 402	66,99	1,98	TH 602	60,22	1,73
3	TH 303	60,75	2,16	TH 403	65,18	2,16	TH 603	66,67	1,34
4	TH 304	58,71	2,19	TH 404	65,98	1,99	TH 604	62,28	1,82
5	TH 305	58,61	2,29	TH 405	62,71	2,11	TH 605	48,99	1,55
6	TH 306	51,95	2,27	TH 406	65,49	2,30	TH 606	62,77	1,95
7	TH 307	59,30	2,46	TH 407	69,77	2,04	TH 607	61,08	1,50
8	TH 308	52,35	2,16	TH 408	69,93	2,29	TH 608	68,04	1,44
9	TH 309	51,62	2,05	TH 409	75,49	1,75	TH 609	56,51	1,39
10	TH 310	56,98	2,12	TH 410	74,35	1,92	TH 610	66,59	1,58
11	TH 311	50,01	2,22	TH 411	77,48	1,93	TH 611	60,42	2,07
12	TH 312	61,05	2,12	TH 412	69,41	2,02	TH 612	59,91	1,45
13	TH 313	51,22	2,10	TH 413	61,85	2,05	TH 613	54,72	1,77
14	TH 314	61,28	2,24	TH 414	62,97	2,20	TH 614	61,23	1,31
15	TH 315	50,53	2,12	TH 415	61,74	2,01	TH 615	55,64	1,70
16	TH 316	56,47	2,04	TH 416	63,24	2,29	TH 616	56,16	1,84
17	TH 317	53,35	1,99	TH 417	64,53	2,01	TH 617	55,71	1,60
18	TH 318	52,32	2,03	TH 418	61,05	2,19	TH 618	56,63	1,81
19	TH 319	51,11	2,37	TH 419	66,51	1,98	TH 619	55,69	1,33
20	TH 320	61,49	2,07	TH 420	59,07	2,05	TH 620	56,74	1,51
21	TH 321	50,66	2,09	TH 421	73,43	2,30	TH 621	54,13	1,57
22	TH 322	58,96	2,24	TH 422	83,20	1,88	TH 622	52,37	1,64
23	TH 323	55,44	2,16	TH 423	81,35	2,07	TH 623	54,30	1,81
24	TH 324	52,95	2,01	TH 424	62,80	2,01	TH 624	51,62	0,98
25	TH 325	53,59	2,22	TH 425	72,75	2,10	TH 625	50,92	2,13
26	TH 326	52,98	2,07	TH 426	59,97	2,01	TH 626	68,32	1,16
27	TH 327	56,52	2,20	TH 427	75,64	2,13	TH 627	58,11	1,36
28	TH 328	52,87	2,10	TH 428	61,07	2,18	TH 628	53,63	2,01
29	TH 329	51,71	2,28	TH 429	58,58	1,97	TH 629	57,19	1,60
30	TH 330	52,71	2,15	TH 430	62,17	1,89	TH 630	61,09	1,15
31	TH 331	53,67	2,16	TH 431	60,06	2,07	TH 631	50,52	1,56
32	TH 332	59,25	2,17	TH 432	59,43	2,02	TH 632	64,28	1,21
33	TH 333	50,34	2,14	TH 433	63,48	2,16	TH 633	53,83	1,56
34	TH 334	58,00	2,30	TH 434	62,53	2,08	TH 634	57,22	1,30
35	TH 335	49,34	2,33	TH 435	60,14	1,91	TH 635	55,87	1,55
36	TH 336	49,52	2,18	TH 436	73,70	1,98	TH 636	59,47	2,01
37	TH 337	57,46	2,19	TH 437	75,56	2,14	TH 637	54,99	1,77
38	TH 338	50,64	2,23	TH 438	76,01	2,15	TH 638	65,32	1,76
39	TH 339	51,43	2,11	TH 439	77,19	2,14	TH 639	63,09	1,29
40	TH 340	58,82	2,06	TH 440	79,67	2,15	TH 640	53,80	1,75
41	TH 341	54,77	2,19	TH 441	80,52	1,85	TH 641	81,69	1,52
42	TH 342	59,39	2,15	TH 442	57,20	1,94	TH 642	73,76	1,52
43	TH 343	51,66	2,18	TH 443	57,81	2,05	TH 643	71,16	1,87
44	TH 344	57,91	2,26	TH 444	59,40	2,21	TH 644	75,29	1,33
45	TH 345	53,37	2,14	TH 445	62,57	1,80	TH 645	81,41	1,23
46	TH 346	59,86	2,07	TH 446	58,64	2,06	TH 646	73,52	1,25
47	TH 347	51,74	2,27	TH 447	65,61	1,98	TH 647	78,42	1,59
48	TH 348	52,53	2,31	TH 448	60,94	1,90	TH 648	64,81	1,81
49	TH 349	65,93	2,01	TH 449	60,12	2,09	TH 649	68,27	1,37
50	TH 350	57,72	2,09	TH 450	59,97	2,10	TH 650	71,20	1,65



## RESULTADOS DA ANÁLISE DE TEOR DE NÍQUEL – MINÉRIO BLENDADO

Fração	-4,75+3,35 mm			-6,35+4,75 mm			-9,50+6,35 mm		
	ID	Massa (g)	Ni (%)	ID	Massa (g)	Ni (%)	ID	Massa (g)	Ni (%)
1	TH 301	50,82	2,20	TH 401	68,69	2,17	TH 601	54,90	1,42
2	TH 302	54,80	2,27	TH 402	66,99	1,98	TH 602	60,22	1,73
3	TH 303	60,75	2,16	TH 403	65,18	2,16	TH 603	66,67	1,34
4	TH 304	58,71	2,19	TH 404	65,98	1,99	TH 604	62,28	1,82
5	TH 305	58,61	2,29	TH 405	62,71	2,11	TH 605	48,99	1,55
6	TH 306	51,95	2,27	TH 406	65,49	2,30	TH 606	62,77	1,95
7	TH 307	59,30	2,46	TH 407	69,77	2,04	TH 607	61,08	1,50
8	TH 308	52,35	2,16	TH 408	69,93	2,29	TH 608	68,04	1,44
9	TH 309	51,62	2,05	TH 409	75,49	1,75	TH 609	56,51	1,39
10	TH 310	56,98	2,12	TH 410	74,35	1,92	TH 610	66,59	1,58
11	TH 311	50,01	2,22	TH 411	77,48	1,93	TH 611	60,42	2,07
12	TH 312	61,05	2,12	TH 412	69,41	2,02	TH 612	59,91	1,45
13	TH 313	51,22	2,10	TH 413	61,85	2,05	TH 613	54,72	1,77
14	TH 314	61,28	2,24	TH 414	62,97	2,20	TH 614	61,23	1,31
15	TH 315	50,53	2,12	TH 415	61,74	2,01	TH 615	55,64	1,70
16	TH 316	56,47	2,04	TH 416	63,24	2,29	TH 616	56,16	1,84
17	TH 317	53,35	1,99	TH 417	64,53	2,01	TH 617	55,71	1,60
18	TH 318	52,32	2,03	TH 418	61,05	2,19	TH 618	56,63	1,81
19	TH 319	51,11	2,37	TH 419	66,51	1,98	TH 619	55,69	1,33
20	TH 320	61,49	2,07	TH 420	59,07	2,05	TH 620	56,74	1,51
21	TH 321	50,66	2,09	TH 421	73,43	2,30	TH 621	54,13	1,57
22	TH 322	58,96	2,24	TH 422	83,20	1,88	TH 622	52,37	1,64
23	TH 323	55,44	2,16	TH 423	81,35	2,07	TH 623	54,30	1,81
24	TH 324	52,95	2,01	TH 424	62,80	2,01	TH 624	51,62	0,98
25	TH 325	53,59	2,22	TH 425	72,75	2,10	TH 625	50,92	2,13
26	TH 326	52,98	2,07	TH 426	59,97	2,01	TH 626	68,32	1,16
27	TH 327	56,52	2,20	TH 427	75,64	2,13	TH 627	58,11	1,36
28	TH 328	52,87	2,10	TH 428	61,07	2,18	TH 628	53,63	2,01
29	TH 329	51,71	2,28	TH 429	58,58	1,97	TH 629	57,19	1,60
30	TH 330	52,71	2,15	TH 430	62,17	1,89	TH 630	61,09	1,15
31	TH 331	53,67	2,16	TH 431	60,06	2,07	TH 631	50,52	1,56
32	TH 332	59,25	2,17	TH 432	59,43	2,02	TH 632	64,28	1,21
33	TH 333	50,34	2,14	TH 433	63,48	2,16	TH 633	53,83	1,56
34	TH 334	58,00	2,30	TH 434	62,53	2,08	TH 634	57,22	1,30
35	TH 335	49,34	2,33	TH 435	60,14	1,91	TH 635	55,87	1,55
36	TH 336	49,52	2,18	TH 436	73,70	1,98	TH 636	59,47	2,01
37	TH 337	57,46	2,19	TH 437	75,56	2,14	TH 637	54,99	1,77
38	TH 338	50,64	2,23	TH 438	76,01	2,15	TH 638	65,32	1,76
39	TH 339	51,43	2,11	TH 439	77,19	2,14	TH 639	63,09	1,29
40	TH 340	58,82	2,06	TH 440	79,67	2,15	TH 640	53,80	1,75
41	TH 341	54,77	2,19	TH 441	80,52	1,85	TH 641	81,69	1,52
42	TH 342	59,39	2,15	TH 442	57,20	1,94	TH 642	73,76	1,52
43	TH 343	51,66	2,18	TH 443	57,81	2,05	TH 643	71,16	1,87
44	TH 344	57,91	2,26	TH 444	59,40	2,21	TH 644	75,29	1,33
45	TH 345	53,37	2,14	TH 445	62,57	1,80	TH 645	81,41	1,23
46	TH 346	59,86	2,07	TH 446	58,64	2,06	TH 646	73,52	1,25
47	TH 347	51,74	2,27	TH 447	65,61	1,98	TH 647	78,42	1,59
48	TH 348	52,53	2,31	TH 448	60,94	1,90	TH 648	64,81	1,81
49	TH 349	65,93	2,01	TH 449	60,12	2,09	TH 649	68,27	1,37
50	TH 350	57,72	2,09	TH 450	59,97	2,10	TH 650	71,20	1,65