



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE  
MINAS GERAIS  
UNIDADE ARAXÁ

TAIRONY FERREIRA DE ASSIS

**ESTUDO DAS VARIÁVEIS DO MOINHO DE BOLAS DO  
LABORATÓRIO DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS DA  
UNIDADE ARAXÁ**

ARAXÁ-MG

2019

TAIRONY FERREIRA DE ASSIS

ESTUDO DAS VARIÁVEIS DO MOINHO DE BOLAS DO  
LABORATÓRIO DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS DA  
UNIDADE ARAXÁ

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
de Minas, do Centro Federal de  
Educação Tecnológica de Minas Gerais  
- CEFET/MG, como requisito parcial  
para obtenção do título de Engenharia  
de Minas.

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Me. Tamiris Fonseca  
de Souza

ARAXÁ-MG

2019

Tairony Ferreira de Assis

Estudo das variáveis do moinho de bolas do Laboratório de Tratamento de Minérios da  
unidade Araxá

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
de Minas do Centro Federal de  
Educação Tecnológica de Minas  
Gerais – CEFET/MG, como requisito  
parcial para a obtenção de grau de  
bacharel em Engenharia de Minas

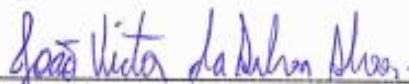
Araxá, 19 de junho de 2019



\_\_\_\_\_  
Presidente e Orientadora: Profa. Me. Tamiris Fonseca de Souza  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



\_\_\_\_\_  
Membro Titular: Profa. Me Kelly de Souza Pires  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



\_\_\_\_\_  
Membro Titular: Especialista João Victor da Silva Alves  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

## RESUMO

O aumento da demanda de minério de ferro e os baixos teores presentes nos depósitos exigiram mais etapas de cominuição para liberar as partículas de mineral-minério e assim realizar as etapas de concentração. As etapas responsáveis por reduzir a granulometria são a britagem e a moagem, elas representam o maior custo operacional no tratamento mineral. A moagem é caracterizada por ser a última etapa da fragmentação, se limitando a partículas mais finas, sendo preferencialmente realizada a úmido. Desta forma, o presente trabalho consiste no estudo das variáveis tempo de moagem, fator de enchimento e porcentagem de sólidos, visando otimizar o funcionamento do moinho de bolas do Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, campus Araxá. Foram realizados testes com amostras de itabirito oriundas da mina de Posse, situada no Quadrilátero Ferrífero, com o tempo variando em 20 e 30 minutos, a porcentagem de sólidos alterando em 25, 40, 55 e 70%, enquanto que o fator de enchimento variava em 30 e 40%. Com os dados das análises granulométricas, as curvas granulométricas e os gráficos dos modelos de Gates Gaudin Schumann e Rosin Rammler foram plotados. O modelo de Rosin Rammler foi o que melhor descreveu a distribuição granulométrica da alimentação e dos produtos moídos, porém os valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram baixos, inviabilizando os cálculos das relações de redução. Diante dessa problemática os valores de  $A_{80}$  e  $P_{80}$  foram obtidos através das curvas granulométricas. O melhor cenário foi para 25% de sólidos, 40% de enchimento e 20 minutos de moagem, pois apresentou maior relação de redução, observando que o aumento do fator de enchimento e a diminuição da porcentagem de sólidos geram aumento da relação de redução.

**Palavras-chave:** Moagem, Itabirito, Porcentagem de Sólidos, Fator de Enchimento, Relação de Redução.

## ABSTRACT

The increase in the demand for iron ore and the low content of deposits demanded more stages of comminution to liberate the mineral particles, so that the concentration steps could be carried out. The steps responsible for reducing particle size are crushing and milling, they represent the highest operating cost in mineral processing. The milling is characterized as being the last step of the fragmentation, being limited to finer particles, being preferably carried out wet. In this way, the present work consists of the study of the variables milling time, filling factor and percentage of solids, aiming to optimize the ball mill operation of the CEFET-MG Ore Treatment Laboratory, Araxá campus. Itabirite samples from the Posse mine, located in the Quadrilátero Ferrífero, were tested for time varying in 20 and 30 minutes, the percentage of solids changing in 25, 40, 55 and 70%, while the filling factor varied in 30 and 40%. With the data of the particle size analysis, the grain size curves and the graphs of the models of Gates Gaudin Schumann and Rosin Rammler were plotted. Rosin Rammler's model was the best one to describe the particle size distribution of feed and ground products, but the values of the determination coefficients ( $R^2$ ) were low, making it impossible to calculate the reduction ratios. In view of this problem, the values of A80 and P80 were obtained through the particle size curves. The best scenario was for 25% solids, 40% filling and 20 minutes, as it presented a higher reduction ratio, noting that the increase of the filling factor and the decrease of the solids percentage increase the reduction ratio.

**Keywords:** Milling, Itabirite, Percentage of Solids, Fill Factor, Reduction Ratio.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa da localização geográfica da mina de Posse. ....	16
Figura 2: Mecanismos de fragmentação. ....	19
Figura 3: Britador de mandíbulas. ....	21
Figura 4: Moinho cilíndrico. ....	23
Figura 5: Moagem em regime de cascata. ....	24
Figura 6: Moagem em regime de catarata. ....	25
Figura 7: Fluxograma da preparação da amostra. ....	28
Figura 8: Amostras armazenadas em bandejas. ....	29
Figura 9: Pilha alongada. ....	29
Figura 10: Peneiramento realizado por agitador eletromecânico. ....	30
Figura 11: Moinho e os corpos moedores. ....	32
Figura 12: Moinho de bolas. ....	33
Figura 13: Difratoograma da amostra. ....	37
Figura 14: Curva de análise granulométrica da alimentação do moinho. ....	38
Figura 15: Curvas granulométricas da alimentação e dos testes de moagem realizados durante 20 e 30 minutos. ....	39
Figura 16: Curvas granulométricas da alimentação e dos produtos da moagem com 30% de enchimento e polpa com diferentes porcentagens de sólidos. ....	40
Figura 17: Curvas granulométricas da alimentação e dos produtos da moagem com 40% de enchimento e polpa com diferentes porcentagens de sólidos. ....	42
Figura 18: Curvas granulométricas da alimentação e dos produtos tendo como variável o fator de enchimento. ....	43
Figura 19: Gráfico da influência das variáveis na relação de redução. ....	44
Figura 20: Gráfico da otimização das variáveis. ....	45
Figura 21: Curva RR da Alimentação. ....	55
Figura 22: Curva RR para 30% de enchimento e 25% de sólidos. ....	56
Figura 23: Curva RR para 30% de enchimento e 40% de sólidos. ....	56
Figura 24: Curva RR para 30% de enchimento e 55% de sólidos. ....	56
Figura 25: Curva RR para 30% de enchimento e 70% de sólidos. ....	57
Figura 26: Curva RR para 40% de enchimento e 25% de sólidos. ....	57
Figura 27: Curva RR para 40% de enchimento e 40% de sólidos. ....	57
Figura 28: Curva RR para 40% de enchimento e 55% de sólidos. ....	58
Figura 29: Curva RR para 40% de enchimento e 70% de sólidos. ....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fórmula química e teor de ferro (%).....	12
Tabela 2 - Reserva e metal contido de minério de ferro.....	13
Tabela 3 - Maiores companhias produtoras de minério de ferro.....	14
Tabela 4 - Características do moinho de bolas.....	32
Tabela 5 - Variáveis dos testes de moagem.....	34
Tabela 6 - Densidade das amostras.....	36
Tabela 7 - Relação de redução para 30% de enchimento.....	41
Tabela 8 - Relação de redução para 40% de enchimento.....	42
Tabela 9 - Testes de picnometria.....	49
Tabela 10 - Parâmetros dos testes.....	49
Tabela 11 - Análise granulométrica recalculada da alimentação.....	50
Tabela 12 - Análise granulométrica recalculada da moagem de 20 minutos com 40% de enchimento e 40% de sólidos.....	51
Tabela 13 - Análise granulométrica recalculada da moagem de 30 minutos com 40% de enchimento e 40% de sólidos.....	51
Tabela 14 - Análise granulométrica recalculada da moagem com 30% de enchimento e 25% de sólidos.....	52
Tabela 15 - Análise granulométrica recalculada da moagem com 30% de enchimento e 40% de sólidos.....	52
Tabela 16 - Análise granulométrica recalculada da moagem com 30% de enchimento e 55% de sólidos.....	53
Tabela 17 - Análise granulométrica recalculada da moagem com 30% de enchimento e 70% de sólidos.....	53
Tabela 18 - Análise granulométrica recalculada da moagem com 40% de enchimento e 25% de sólidos.....	54
Tabela 19 - Análise granulométrica recalculada da moagem com 40% de enchimento e 55% de sólidos.....	54
Tabela 20 - Análise granulométrica recalculada da moagem com 40% de enchimento e 70% de sólidos.....	55

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	9
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	11
2.1	MINÉRIO DE FERRO	11
2.1.1	CENÁRIO MUNDIAL	13
2.1.2	CENÁRIO NACIONAL	14
2.1.3	QUADRILÁTERO FERRÍFERO	15
2.1.4	MINA DE POSSE	16
2.2	COMINUIÇÃO	17
2.2.1	LEIS DA COMINUIÇÃO	17
2.2.2	MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO	19
2.2.3	BRITAGEM	20
2.2.4	MOAGEM	21
2.2.5	REGIMES DE OPERAÇÃO DOS MOINHOS DE BOLAS	24
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	28
3.1	PREPARAÇÃO DA AMOSTRA	28
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	30
3.3	ENSAIOS DE MOAGEM	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	36
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	36
4.2	VELOCIDADE DE OPERAÇÃO DO MOINHO	37
4.3	ENSAIOS DE MOAGEM	38
4.3.1	DETERMINAÇÃO DO $A_{80}$	38
4.3.2	ANÁLISE DO TEMPO DE MOAGEM	39
4.3.3	TESTES DE MOAGEM COM 30% DE ENCHIMENTO	40
4.3.4	TESTES DE MOAGEM COM 40% DE ENCHIMENTO	41
4.3.5	ANÁLISE DO FATOR DE ENCHIMENTO	43
4.4	OTIMIZAÇÃO DA MOAGEM	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	46
	<b>REFERÊNCIAS</b>	47
	<b>APÊNDICE A.1- DENSIDADE</b>	49
	<b>APÊNDICE A.2- PARÂMETROS DOS TESTES</b>	49
	<b>APÊNDICE A.3- ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS</b>	50
	<b>APÊNDICE A.4- CURVAS DO MODELO MATEMÁTICO RR</b>	55



# 1 INTRODUÇÃO

A demanda de minério de ferro aumentou consideravelmente devido as guerras ocorridas no século XX, visto que o ferro é uma matéria prima fundamental para a fabricação de armamentos e veículos. Recentemente, a grande demanda por minério de ferro é proveniente da China, que utiliza o material para a fabricação de aço, sendo empregado principalmente no setor imobiliário.

Seguindo a tendência mundial do setor, as jazidas de minério de ferro presentes no Quadrilátero Ferrífero passaram a explorar cada vez mais itabiritos, que necessitam de maior redução granulométrica e apresentam menor teor de ferro.

Em conjunto com essa problemática, ocorreu o aumento nos custos de energia e a queda no preço dos concentrados de minério de ferro, tornando necessário a melhoria da eficiência das operações da indústria mineral.

A cominuição é uma etapa importante no tratamento de minério, pois reduz a granulometria, facilitando o transporte e liberando a partícula mineral, contribuindo assim com as etapas seguintes de concentração.

Diversos estudos são feitos com relação a escolha, dimensionamento e manutenção dos equipamentos de cominuição, de forma a torná-los cada vez mais eficientes, pois representam o principal custo operacional das usinas de tratamento, devido ao grande consumo energético.

Quando a moagem é executada incorretamente, verifica-se sobremoagem ou submoagem. A sobremoagem produz um material com granulometria muito fina, gerando gastos energéticos desnecessários, enquanto que na submoagem o produto tem granulometria mais grosseira, podendo não atingir o grau de liberação esperado. Em ambos, observa-se que a eficiência reduz consideravelmente.

Dentro deste contexto, variáveis como o fator de enchimento, porcentagem de sólidos e o tempo de operação influenciam para a sobremoagem e a submoagem. Por isso, o presente trabalho tem por objetivo

verificar a maior relação de redução para o moinho de bolas do Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, campus Araxá.

Este trabalho foi desenvolvido seguindo algumas etapas. No segundo capítulo é exposto a revisão bibliográfica sobre os principais assuntos referentes ao minério de ferro, cenário mundial, cenário nacional e a cominuição. No terceiro capítulo é apresentado a metodologia adotada para os testes em escala laboratorial, características da amostra, bem como os procedimentos adotados durante os testes. Já no quarto capítulo é exposto os resultados obtidos nos testes, comparando-os com a literatura. O quinto e último capítulo discorre a conclusão do trabalho, levando em conta os objetivos propostos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão abordando os principais assuntos referentes ao minério de ferro, conceitos de cominuição e, especificamente, de moagem.

### 2.1 MINÉRIO DE FERRO

O metal ferro (Fe) é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, mas o elemento na forma nativa é dificilmente encontrado, com exceção de alguns basaltos e meteoritos. Mesmo presente na composição de diversos minerais, a grande maioria não tem exploração economicamente viável para se obter o ferro (COELHO, 1986).

A viabilidade econômica está intimamente ligada às condições geológicas e metalogenéticas das jazidas. A mineralogia do minério, os teores de Fe, a paragênese, a estrutura e a textura das rochas na qual o mineral-minério está presente e diversos fatores geológicos influem na probabilidade de um empreendimento minerário se tornar realidade (PINHEIRO, 2000).

Os minérios de ferro que tem exploração economicamente viável podem ser classificados a partir da composição química do mineral. Carvalho *et al.* (2014) os divide entre óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos. A forma mais usual para se obter o metal é industrialmente a partir de minerais como a magnetita, hematita e goethita, que são os minérios de ferro de maior importância devido ao teor de ferro, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1- Fórmula química e teor de ferro (%)

<b>Mineral</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Teor de ferro</b>
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	72,4
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	69,9
Goethita	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	62,9
Limonita	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	59,8
Ilmenita	$\text{FeTiO}_3$	36,8
Siderita	$\text{FeCO}_3$	48,2
Pirita	$\text{FeS}_2$	46,5
Pirrotita	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$	61,0

*Fonte: Adaptado de Carvalho et al. 2014.*

A magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) contém aproximadamente 72% de Fe, possui cor preta, brilho metálico e é ferromagnética. A hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) é paramagnética, contém cerca de 70% de Fe e sua cor varia de preta a avermelhada de acordo com sua granulometria. A goethita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$ ) tem cor amarela a marrom, textura porosa, brilho adamantino a opaco, contém cerca de 60% de Fe e é diamagnética (COELHO, 1986).

Segundo Carvalho *et al.* (2014), os depósitos de minério de ferro são divididos em cinco grupos principais: sedimentares acamadados, formados por soluções hidrotermais, relacionados a atividades vulcânicas, relacionados a processos de metamorfismo e/ou deformação e os resultantes de alteração e acúmulo na superfície terrestre.

Entre essas categorias, se destacam os depósitos sedimentares acamadados, por constituírem os depósitos das formações ferríferas bandadas (FFB), também conhecidos pelo termo itabirito. Estes são formados por rochas bandadas ou laminadas compostas por hematita-magnetita e sílica ( $\text{SiO}_2$ ), correspondendo aos maiores depósitos de ferro, que apresentam teor entre 20 a 35%, podendo alcançar até 55% (COELHO, 1986).

### 2.1.1 CENÁRIO MUNDIAL

De acordo com a USGS (2019), as reservas mundiais de minério de ferro foram avaliadas em aproximadamente 170 bilhões de toneladas, enquanto as brasileiras foram estimadas em 32 Bt (bilhões de toneladas), que correspondem a 18,82% das reservas mundiais, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Reserva e metal contido de minério de ferro.

<b>Países</b>	<b>Reservas (Bt)</b>	<b>Metal contido (Bt)</b>
Austrália	50,0	24,0
Brasil	32,0	17,0
Canadá	6,0	2,3
China	20,0	6,9
Índia	5,4	3,2
Rússia	25,0	14,0
Outros países	31,6	16,6
Total mundial	170,0	84,0

*Fonte: Adaptado de USGS (2019)*

Segundo a USGS (2019) a produção de minério de ferro em 2018 aumentou ligeiramente em comparação com o ano de 2017, que representou aumento em relação ao ano anterior de 20 Mt (milhões de toneladas). A produção global de minério de ferro no período de 2012 a 2016 obteve um crescimento na ordem de 280 Mt.

De acordo com os dados do Steelonthenet (2017), as companhias Vale, Rio Tinto, BHP Billiton são as maiores produtoras de minério de ferro, elas apresentam em conjunto uma capacidade de produção de 1,415 bilhões de toneladas ano, que correspondem a 37,1% da produção mundial, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Maiores companhias produtoras de minério de ferro.

<b>Companhia</b>	<b>País sede</b>	<b>Capacidade (Mt/ano)</b>	<b>(%)</b>
Vale	Brasil	540,2	14,2
Rio Tinto	Reino Unido	466,3	12,2
BHP Billiton	Austrália	408,6	10,7
Fortescue Metals	Austrália	217,7	5,7
ArcelorMittal	Reino Unido	109,2	2,9
Anglo American	África do Sul	83,7	2,2
Imidro	Irã	60,7	1,6
Anshan Iron & Steel	China	58,9	1,5
Metalloinvest	Rússia	53,9	1,4
LKAB	Suécia	49,6	1,3
Metinvest Holding	Ucrânia	48,8	1,3
Evrax	Rússia	48,4	1,3
NMDC	Índia	44,7	1,2
Shougang Beijing	China	42,6	1,1
Complejo Siderúrgico Nacional	Venezuela	41,9	1,1
Cliffs Natural Resources	Estados Unidos	41,0	1,1
Usiminas	Brasil	37,6	1,0
Hancock Prospecting	Austrália	31,8	0,8
CSN	Brasil	30,4	0,8
US Steel	Estados unidos	25,7	0,7
<b>Total</b>		<b>2275,0</b>	<b>59,7</b>

Fonte: Adaptado de Steelonthenet (2017).

### 2.1.2 CENÁRIO NACIONAL

De acordo com a USGS (2019), o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de minério de ferro, suas principais regiões produtoras estão localizadas no Quadrilátero Ferrífero, na província mineral de Carajás e na região de Corumbá.

Heider (2016), afirma que a produção nacional no período de 2000 a 2014 aumentou em 198,6 Mt, enquanto que as exportações acumuladas atingiram a ordem de 4,078 Bt de minério de ferro.

Em 2014, as companhias brasileiras produziram cerca de 411,8 Mt com teor médio de 63,5% de ferro. Os estados que produziram mais foram Minas Gerais (68,4%), Pará (29,2%) e Mato Grosso do Sul (1,2%). No mesmo ano, foram exportados 294 Mt de minério de ferro, com valor de US\$-FOB 20 Bt, que representam aumento de 4,4% na quantidade exportada e diminuição de 23,1% no valor em comparação ao ano anterior (JESUS, 2015).

As reservas medidas e indicadas de minério de ferro no Brasil colocam o país em um lugar de destaque em relação as reservas internacionais. Principalmente, ao considerá-las em relação ao ferro contido, devido ao alto teor da hematita presente no estado do Pará e do Itabirito em Minas Gerais. As reservas lavráveis nacionais contêm teor médio de 49,0% de ferro. Os principais estados com reservas de minério de ferro são: Minas Gerais (72,5% das reservas e 46,3% de teor médio), Mato Grosso do Sul (13,1% das reservas e 55,3% de teor médio) e Pará (10,7% das reservas e 64,8% de teor médio). (JESUS, 2015).

Segundo Carvalho *et al.* (2014), os minérios de ferro explorados nacionalmente são nomeados em itabirito, hematita e canga, e apresentam altos teores de ferro e baixos teores de contaminantes, sendo estes prejudiciais aos processos siderúrgicos, como o enxofre, alumínio, fósforo e carbonatos.

### **2.1.3 QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

O Quadrilátero Ferrífero é uma região abundante em formações ferríferas e jazidas de minério de ferro, localiza-se no centro-sul do estado de Minas Gerais. De acordo com Carvalho *et al.* (2014), o minério de ferro explotado nessa região é dividido em dois grupos principais: minério itabirítico e minério hematítico. O minério itabirítico é caracterizado por bandas alternadas constituídas de óxidos de ferro ou sílica, e o teor de ferro varia de 20 a 55%. O minério hematítico é mais homogêneo, sendo constituído principalmente por hematita, garantindo teores de ferro superiores a 64%.

No Quadrilátero Ferrífero encontra-se a canga, outro tipo de minério de ferro, que possui menor valor econômico. Ou seja, é um minério secundário, originado de ações lixiviantes e intempéricas, possuindo alto teor de fósforo e

baixo teor de ferro, mas é utilizado em usinas de carvão vegetal devido a sua porosidade (CARVALHO *et al.*, 2014).

#### 2.1.4 MINA DE POSSE

A companhia Crusader do Brasil Mineração é a responsável por explorar e realizar o tratamento a seco do minério de ferro da mina de Posse, que se localiza no município de Caeté, região metropolitana de Belo Horizonte, em Minas Gerais, como é representado na Figura 1.



Figura 1: Mapa da localização geográfica da mina de Posse.

Fonte: Adaptado de SIAM (2013).

De acordo com a SIAM (2013), a lavra é realizada a céu aberto, descendente, com bancadas sucessivas a meia encosta, subverticais, com altura de 10 metros e bermas de 4 metros. O minério é friável, por isso o material é desmontado mecanicamente por escavadeira hidráulica, e o carregamento é realizado por carregadeiras de porte médio, enquanto que o transporte é efetuado por caminhões basculantes.

A unidade de tratamento de minério da empresa é composta de britagem primária, classificação em dois *decks*, com telas de 32 mm e 6,35 mm, na qual



o retido da peneira de 32 mm passa por um britador cônico secundário em circuito fechado. O retido na peneira de 6,35 mm é enviado para uma segunda etapa de classificação em uma peneira com dois *decks*, com telas de 19 mm e 6,35 mm. O retido na peneira de 6,35 mm será o produto hematitinha, enquanto que o passante na mesma é estocado para posteriormente ser comercializado. A capacidade de produção da unidade de tratamento é de 130 t/h (SIAM, 2013).

O estéril é constituído por quartzito Moeda, xisto Batatal e formações Gandarela e Piracicaba, para deposição do material foi definido a implantação de uma pilha de estéril de 5 hectares, presente na área de concessão. Por possuir baixa relação estéril minério (REM), o estéril é destinado a recuperação de uma área com iniciação de erosão, que se encontra próximo da cava.

## **2.2 COMINUIÇÃO**

A cominuição se caracteriza por reduzir as dimensões físicas de determinadas partículas, por meio do rompimento de suas ligações estruturais. A etapa de fragmentação é extremamente importante na mineração, pois facilita o carregamento e o transporte do material, adequa a granulometria do minério às exigências dos clientes e atinge o grau de liberação necessário para realizar a concentração do mineral minério nas etapas posteriores (ARAUJO *et al.*, 2007; CHAVES e PERES, 2012).

Na mineração as etapas de cominuição despertam grande atenção, pois o consumo energético na fragmentação representa o maior custo operacional do tratamento mineral. Diversos pesquisadores, em busca de reduzir os custos energéticos das operações relacionadas, criaram as teorias da cominuição, que consistem em relacionar a quantidade de energia fornecida e a granulometria das partículas do produto a partir da granulometria da alimentação.

### **2.2.1 LEIS DA COMINUIÇÃO**

Segundo Luz *et al.* (2010), a teoria mais antiga foi proposta por Peter Ritter von Rittinger, em 1867, sustentando a ideia de que a energia consumida para cominuir é diretamente proporcional a nova área de superfície das partículas, como expressa a Equação 1:

$$E = K(S_1 - S_0) \quad \text{Equação 1}$$

sendo:

E = energia consumida por unidade de massa alimentada;

K = constante de proporcionalidade;

S<sub>1</sub> = área da partícula do produto;

S<sub>0</sub> = área da partícula da alimentação.

A segunda lei da cominuição foi elaborada por Friedrich Kick no ano de 1885, e afirma que o trabalho necessário é proporcional a redução do volume das partículas fragmentadas, como é descrita pela Equação 2:

$$E = C \log \frac{D_0}{D_1} \quad \text{Equação 2}$$

onde:

C = constante;

D<sub>0</sub> = diâmetro inicial da partícula;

D<sub>1</sub> = diâmetro final da partícula;

Ocorreram várias discussões entre Rittinger e Kick, pela dificuldade de analisar a energia gasta na fragmentação, pois teoricamente obteve-se energia menor do que a verificada experimentalmente nas operações de cominuição. De acordo com Luz *et al.* (2010), seguindo essa linha de pensamento Fred Chester Bond propôs em 1952 uma equação paramétrica, demonstrando que o trabalho necessário para diminuir o tamanho da partícula é inversamente proporcional a raiz quadrada do tamanho, como mostra a Equação 3:

$$E = E_0 \left[ \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right] \quad \text{Equação 3}$$

sendo:

P = tamanho do produto;

F = tamanho da alimentação;

E<sub>0</sub> = constante;

Tamanho = abertura da peneira que permite a passagem de 80% do material.

Posteriormente, Bond substituiu a constante por 10 WI (*Work Index*), que demonstra a resistência a cominuição de um material até a granulometria na qual 80% é passante na peneira de 100  $\mu\text{m}$ , tendo assim a Equação 4:

$$E = 10WI \left[ \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right] \quad \text{Equação 4}$$

As leis de fragmentação fornecem até os dias atuais uma boa estimativa da energia necessária nas etapas de cominuição, como a britagem e a moagem, que apresentam diferentes mecanismos de redução.

### 2.2.2 MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO

De acordo com Beraldo (1987), para ocorrer a fragmentação da partícula é necessário que esta seja submetida a um fenômeno físico com força superior à sua resistência. Podendo realizar-se por compressão, cisalhamento e/ou impacto, com a forma da fratura dependendo da natureza da partícula e de como se aplica a força, como mostra a Figura 2.

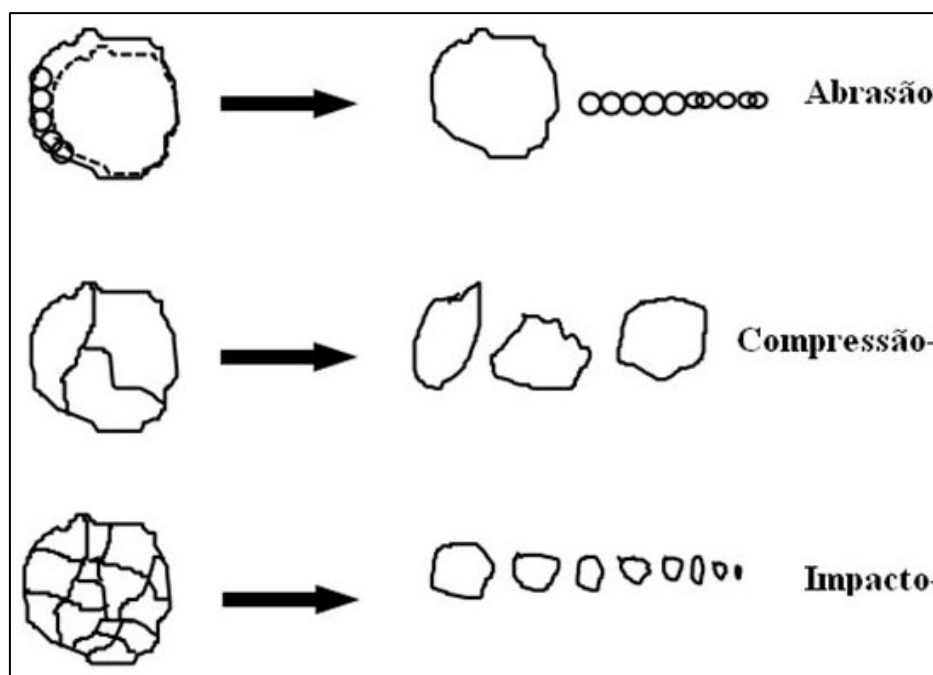


Figura 2: Mecanismos de fragmentação.  
Fonte: Adaptado de Araujo *et al.* (2007).

No cisalhamento ou abrasão, as partículas são inseridas entre duas superfícies com movimentos contrários. Neste mecanismo observa-se a produção de grande quantidade de finos e as partículas geradas tem sua

granulometria pouco reduzida, pois a força não é suficiente para provocar fratura na totalidade do material (ARAUJO *et al.*, 2007).

Na compressão as partículas são submetidas a esforços lentos entre duas superfícies. Os fragmentos decorrentes do mecanismo são geralmente pequenos, e o tamanho das partículas se mantem próximo do original (ARAUJO *et al.*, 2007).

O mecanismo de impacto é o que apresenta maior eficiência energética, pois o trabalho é realizado através da energia cinética de forma rápida e com intensidade maior que a resistência do material, formando partículas com pequena granulometria (BERALDO, 1987).

### **2.2.3 BRITAGEM**

A britagem é o primeiro estágio de fragmentação, na qual as partículas grosseiras sofrem a ação de forças de compressão ou de impacto, por isso as forças aplicadas são elevadas e a relação de redução (RR) é de até 8:1, ou seja, pequena, sendo indispensável três ou quatro etapas sucessivas. Essa etapa ocorre geralmente a seco, isto é, com a umidade natural presente no minério, e tem como vantagem a diminuição do desgaste por abrasão (CHAVES e PERES, 2012).

A britagem primária normalmente é a primeira etapa realizada no processamento mineral, pois a sua alimentação é o *run of mine* (ROM), por essa razão o equipamento encontra-se próximo ou dentro da cava (ARAUJO *et al.*, 2007). Os britadores mais utilizados na indústria mineral são os de mandíbulas, os giratórios e os de impacto.

Os britadores de mandíbulas, como mostrado na Figura 3, são utilizados em britagens primária, secundária e terciária. O seu funcionamento consiste em introduzir o material a ser britado entre as duas superfícies, ocorrendo a esmagação por compressão durante o movimento de aproximação, posteriormente durante o movimento de afastamento da placa os fragmentos resultantes do processo escoam por gravidade (CHAVES e PERES, 2012).

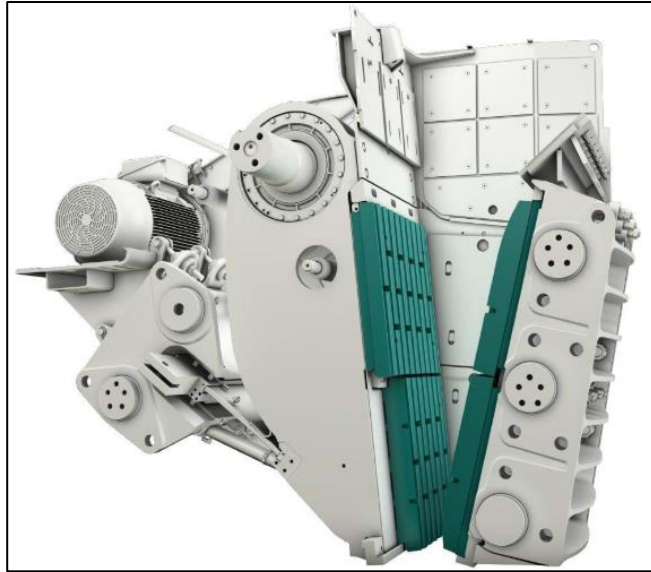


Figura 3: Britador de mandíbulas.  
Fonte: Adaptado de Metso (2018).

Nos britadores giratórios existe o cone, superfície que possui movimento excêntrico, ou seja, aproxima e afasta das paredes do manto. À medida que uma parte está aproximando do manto a outra se afasta. Ou seja, na aproximação diminui-se o espaço, fazendo com que as partículas sejam esmagadas, enquanto que no afastamento o espaço aumenta e os fragmentos escoam (CHAVES e PERES, 2012).

Devido ao mecanismo de operação os britadores giratórios possuem maior capacidade de produção quando comparados com os de mandíbulas, pois realizam a fragmentação durante todo o processo e permitem um pequeno estoque.

Os britadores de impacto consistem em um rotor que faz com que os martelos presentes no interior do equipamento se choquem com o material a ser fragmentado, com isso as partículas se encontram com uma placa fixa localizada no interior de uma câmara, promovendo a fragmentação por impacto (ARAUJO *et al.*, 2007).

#### **2.2.4 MOAGEM**

A moagem é a última etapa de fragmentação e se limita as granulometrias mais finas, ou seja, abaixo de  $3/4''$ . Os mecanismos de fragmentação presentes nesse estágio são a abrasão e o arredondamento por

ruptura das arestas, esses mecanismos são responsáveis pela grande relação de redução da operação, acima de 100 em moagens finas. A moagem ocorre geralmente em dois estágios: granulometrias maiores (3/4" a 3/8") em moinhos de barras em circuito aberto e as menores (14# e 28#) em moinhos de bolas em circuito fechado (CHAVES e PERES, 2012).

A moagem é feita prioritariamente a úmido, ou seja, em polpa com 50 a 60% de sólidos, pois a umidade facilita o transporte da polpa, dissipa o calor e não emite poeiras. O processo só é realizado a seco quando existe carência de água na região ou em ocasiões em que o material a ser moído interage com o líquido. De acordo com Chaves e Peres (2012), a quantidade de água no processo influencia a velocidade das partículas presentes no interior do moinho, a viscosidade e a densidade da polpa, por isso a porcentagem de sólidos é uma variável importante e deve ser analisada cuidadosamente.

Segundo Araújo *et al.* (2007), os moinhos são revestidos internamente por aços especiais, ferros fundidos, borracha ou cerâmica, que reduzem o desgaste da carcaça, diminuem o escorregamento das cargas moedoras em relação a parede do equipamento e fornecem trajetórias as cargas moedoras.

Nos moinhos, a fragmentação das partículas é realizada pelos corpos moedores, que junto com o material a ser cominuído, ocupa cerca de 50% do volume interno. A cominuição ocorre devido ao movimento realizado pelas cargas, ou seja, barras cilíndricas, bolas de aço, bolas de ferro fundido ou o próprio minério (ARAUJO *et al.*, 2007).

De acordo com Chaves e Peres (2012), os equipamentos de moagem mais importantes são os moinhos de barras, de bolas, os autógenos e os semi-autógenos, pois são utilizados por grande parte das indústrias de tratamento mineral, como é representado na Figura 4.

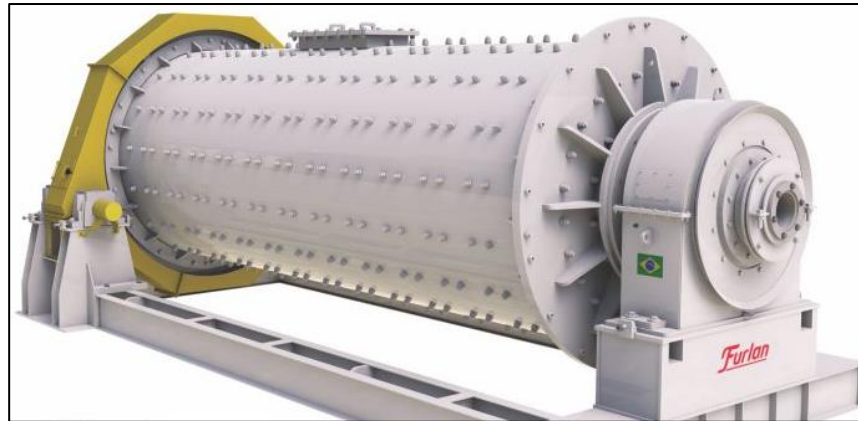


Figura 4: Moinho cilíndrico.  
Fonte: Adaptado de Furlan (2018).

Nos moinhos de barras é necessário que a carga moedora role e seja arremetida contra o minério. À medida que aumenta o diâmetro do equipamento, é necessário diminuir a sua rotação, caso contrário, sua velocidade periférica aumentará consideravelmente. Para evitar que as barras atrevessem dentro do moinho foi padronizado que o seu comprimento deve ser 25% maior que o diâmetro do moinho (CHAVES e PERES, 2012).

Ainda segundo Chaves e Peres (2012), nos moinhos de barras, o volume e o espaço ocupado pela carga é afunilado, ou seja, a partir da alimentação da polpa as partículas são encaminhadas para o início das barras, no qual o material com granulometria mais grosseira fica retido separando as cargas, e é fragmentado à medida que percorre as barras. Isto é, a granulometria das partículas diminui, movendo-se até encontrar a descarga.

Já os moinhos de bolas, geralmente, são aplicados na moagem fina em circuito fechado por ciclones ou classificadores. Os moinhos de bolas se diferem basicamente pelo tipo de descarga. Nos moinhos com descarga *overflow* a velocidade da operação é normalmente 65 a 70% da velocidade crítica e a carga geralmente sai junto com o produto da operação (ARAÚJO *et al.*, 2007).

Ainda de acordo com Araújo *et al.* (2007), outra forma de descarga do produto é pelo diafragma, que consiste em um disco fixado na parte interna do moinho, com certa quantidade de aberturas, que reduzem consideravelmente a produção de finos. Nos moinhos de bolas com descarga por diafragma a velocidade do equipamento gira em torno de 68 a 78% da velocidade crítica.

Os moinhos autógenos são caracterizados por utilizar os fragmentos do próprio minério como corpo moedor, sendo aplicados a minérios que não desgastam facilmente. Esses moinhos geralmente são utilizados como moinhos primários, preparando a alimentação para os moinhos de bolas. (BERALDO, 1987).

Segundo Beraldo (1987), alguns materiais não são consideravelmente competentes para tal operação, por isso utiliza-se pequenas cargas de bolas (máximo 10% do volume), devido a essa diferença os moinhos são denominados como semi-autógenos. Os moinhos autógenos e semi-autógenos são adequados para materiais que apresentam dificuldade de britar e/ou peneirar.

### 2.2.5 REGIMES DE OPERAÇÃO DOS MOINHOS DE BOLAS

A velocidade de rotação, fator de enchimento e diversos outros fatores influenciam no regime de operação do moinho, que são cascata e catarata.

Segundo Chaves e Peres (2012), a moagem em cascata é caracterizada por baixa velocidade e alto fator de enchimento, que geram arrastes dos corpos moedores pela carcaça até certa altura, para posteriormente rolarem uma sobre as outras. Observa-se que nesse regime a fragmentação por impacto é diminuída e a moagem se dá preferencialmente por abrasão e atrito, como representa a Figura 5.

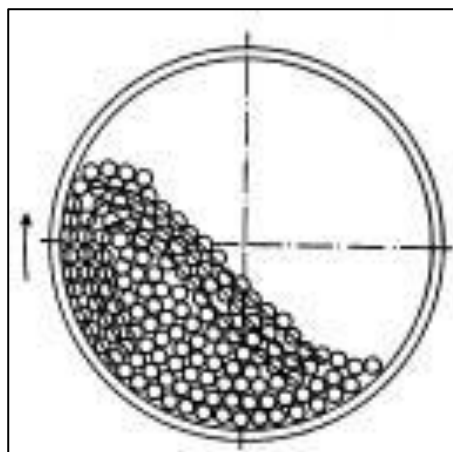


Figura 5: Moagem em regime de cascata.  
Fonte: Adaptado de Chaves e Peres (2012).



Na moagem em catarata, aumenta-se a velocidade de rotação, com isso as cargas são carregadas a uma posição mais elevada e posteriormente caem sobre a polpa, como mostra a Figura 6. Verifica-se que nesse regime o mecanismo de impacto é favorecido, enquanto que a abrasão diminui, sendo adequado na fragmentação de partículas com granulometria mais grosseira. (CHAVES e PERES, 2012)

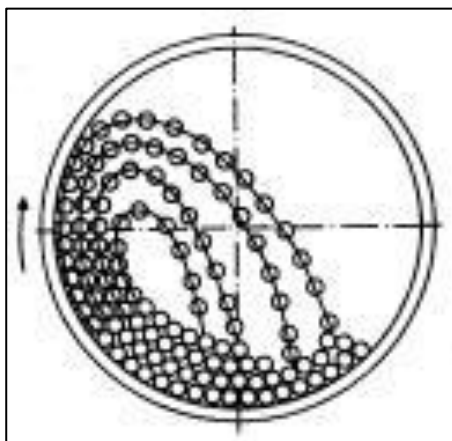


Figura 6: Moagem em regime de catarata.  
Fonte: Adaptado de Chaves e Peres (2012).

Segundo Luz *et al.* (2010), ao aumentar a velocidade do moinho, em um determinado período observa-se que a bola fica presa a carcaça, ou seja, ocorre a centrifugação, não acontecendo a moagem. A velocidade em que esse fato acontece é denominada velocidade crítica do moinho e pode ser calculada pela Equação 5 em metros:

$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{D-d}} \quad \text{Equação 5}$$

onde:

D = diâmetro interno do moinho;

d = diâmetro médio das bolas.

A velocidade de operação de um moinho é relacionada com a porcentagem de sua velocidade crítica. O melhor cenário é verificado quando se opera a 57% da velocidade crítica, pois diminui o consumo de revestimento, de carga e de energia, sem reduzir muito a capacidade do equipamento. (TAGGART, 1954).

De acordo com Luz *et al.* (2010), o fator de enchimento é caracterizado pela porcentagem do volume ocupado por corpos moedores, e pode ser obtido a partir da Equação 6:

$$F = 113 - \frac{126H_c}{D} \quad \text{Equação 6}$$

sendo:

F = fator de enchimento;

H<sub>c</sub> = distância entre o topo do moinho e o topo da carga em inercia, em metros;

D = diâmetro do moinho, em metros.

Utilizar polpa muito diluída tem como consequência uma moagem ineficiente, devido aos poucos choques ocorridos entre as partículas, dispersas na polpa, e as cargas moedoras. Ao elevar a porcentagem de sólidos observa-se um aumento na eficiência da moagem que permanece até determinada situação (LUZ *et al.*, 2010). A porcentagem de sólidos pode ser determinada a partir da Equação 7:

$$\% \text{ sol} = \frac{ds(dp-da)}{dp(ds-da)} \quad \text{Equação 7}$$

onde:

% sol = Porcentagem de sólidos;

ds = densidade do sólido;

dp = densidade da polpa;

da = densidade da água.

Para quantificar a operação de moagem, utiliza-se o grau de redução (Equação 8), que consiste na razão existente entre a abertura na qual 80% das partículas da alimentação é passante e a abertura na qual 80% das partículas do produto é passante.

$$RR = \frac{A_{80}}{P_{80}} \quad \text{Equação 8}$$

sendo:

$A_{80}$  = abertura na qual 80% das partículas da alimentação é passante;

$P_{80}$  = abertura na qual 80% das partículas do produto é passante.

Foggiatto (2009), estudou a influência da velocidade de rotação na granulometria do produto da moagem, variando em 54, 56 e 58 rotações por minuto. A autora observou que o aumento na velocidade de operação do moinho diminui a granulometria dos produtos, sendo assim, os melhores resultados foram com 58 rpm, ou seja, 76% da velocidade crítica.

Flores (2010), analisou a velocidade de operação do moinho e a porcentagem de sólidos para 50% de enchimento. Verificou-se que as curvas granulométricas apresentaram diferenças pouco expressivas ao variar a porcentagem de sólidos em 16 e 24%, valores que são impraticáveis industrialmente. Porém constatou-se que o aumento de rotações por minuto do equipamento gerou reduções na granulometria dos produtos.

Segundo Nascimento (2013), a frequência dos impactos dos corpos moedores no material é dependente do enchimento, ou seja, moagens com maiores enchimentos apresentam maiores frequências de impacto, gerando maior relação de redução. O autor verificou que o aumento do fator de enchimento de 15 para 25% elevou consideravelmente a frequência dos impactos, porém para as faixas de 45 a 75% de enchimento os produtos da moagem apresentaram distribuições granulométricas parecidas, visto que, as frequências dos impactos foram similares.

Foggiatto (2009) analisou a variável fator de enchimento em 32, 35 e 38%, mantendo as demais variáveis de operação constantes. A autora observou que o aumento do grau de enchimento produziu partículas com menores granulometrias.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os procedimentos aplicados para preparação e caracterização da amostra, além da metodologia utilizada para a avaliação do efeito das variáveis operacionais nos ensaios de moagem de minério de ferro.

#### 3.1 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Para a execução deste trabalho foram utilizadas amostras de minério de ferro oriundas da Mina de Posse, localizada no município de Caeté, em Minas Gerais, que é lavrada pela companhia Crusader do Brasil Mineração. As etapas de preparação amostral foram realizadas no Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) do CEFET-MG, Campus Araxá. A Figura 7 ilustra as fases de preparação do material.

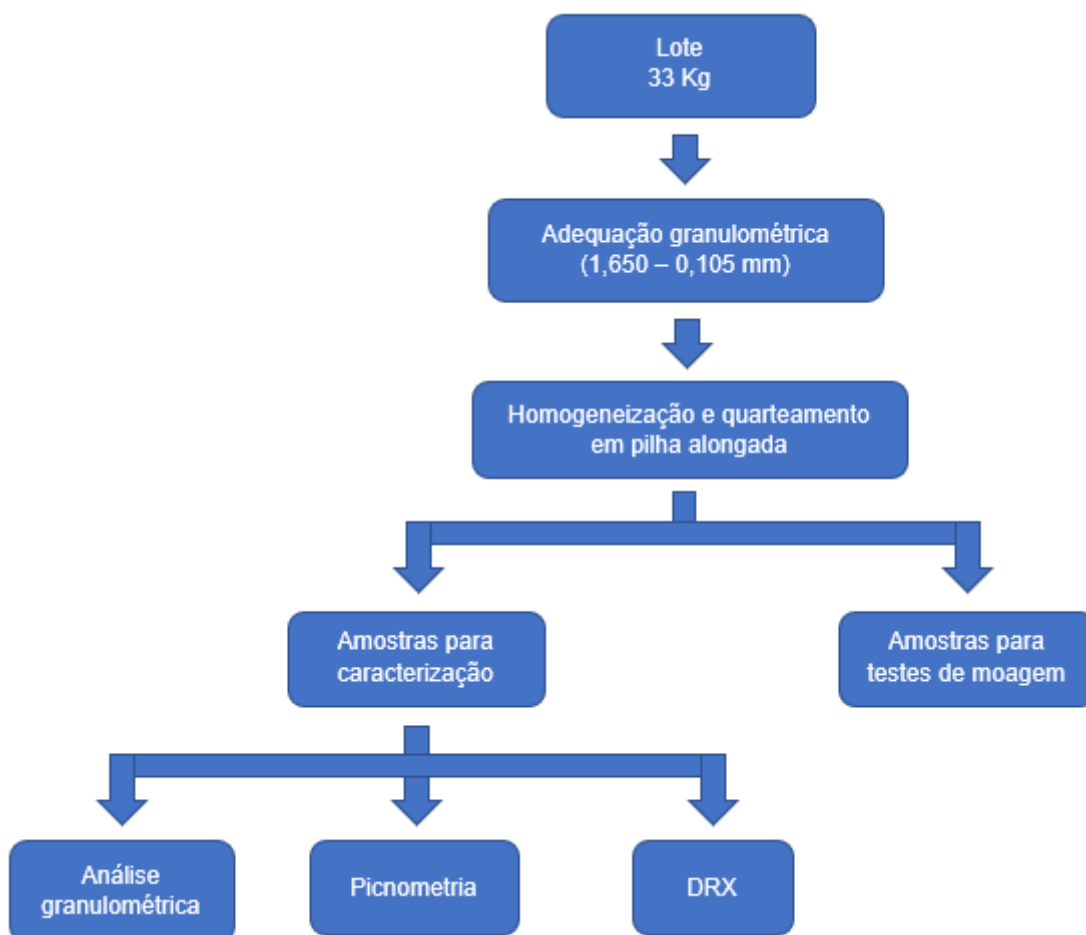


Figura 7: Fluxograma da preparação da amostra.

A empresa forneceu cerca de 33 kg de amostra seca, como representa a Figura 8.



Figura 8: Amostras armazenadas em bandejas.

Realizou-se o peneiramento a seco da amostra na peneira de 1,650 mm, para certificar que toda a amostra era passante nessa malha, posteriormente, foi feito peneiramento a úmido do material na peneira de 0,105mm, objetivando retirar os finos, que são prejudiciais à operação de moagem. Em seguida, realizou-se a homogeneização do material através de pilha alongada que apresentava aproximadamente dois metros de comprimento, como mostra a Figura 9.

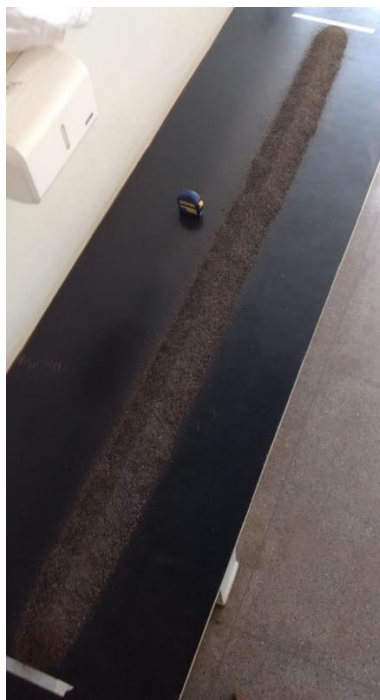


Figura 9: Pilha alongada.

Após realizar a homogeneização por pilha alongada, retirou-se de cada ponta 10% do comprimento. O material recolhido foi redistribuído em cima dos 1,6 metros restantes na pilha. Posteriormente, a pilha foi dividida ao meio

longitudinalmente e em seguida foi retirado alíquotas diametralmente opostas, até obter a quantidade necessária de material para cada teste de moagem.

Após a separação das amostras para os testes de moagem, foi retirada as alíquotas para os ensaios de análise granulométrica, picnometria e difração de raios X.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

Neste estudo foi possível identificar características físico-químicas do material, através dos ensaios de caracterização física e mineralógica.

A amostra de minério de ferro destinada a caracterização física através da análise granulométrica foi peneirada no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, campus Araxá, utilizando-se quatorze peneiras que variavam de 1,650mm (10#) até 0,037mm (400#). O peneiramento foi realizado a úmido com o auxílio de um agitador eletromecânico, como é representado na Figura 10. Com os dados das análises granulométricas realizadas em triplicata, plotou-se as curvas granulométricas para alimentação e determinou-se o  $A_{80}$ .



Figura 10: Peneiramento realizado por agitador eletromecânico.

Para obter a densidade do minério de ferro, realizou-se a picnometria no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, campus Araxá.

Inicialmente, o picnômetro limpo e seco foi pesado em uma balança analítica, em seguida a amostra foi colocada dentro da vidraria e pesou-se o valor referente a amostra e o picnômetro, após a pesagem, completou-se o mesmo com água destilada. Em seguida, foi colocada a tampa do picnômetro, de modo que o excesso de água saísse pelo capilar, posteriormente o conjunto picnômetro, amostra e água foi colocado na balança, de forma a obter o seu peso. Depois da pesagem, o picnômetro foi lavado, para retirar a amostra que estava presente em seu interior. Em seguida, para determinar a massa do recipiente com água, acrescentou-se o líquido e pesou-se a vidraria. Com os valores obtidos devidamente anotados, a densidade do material foi determinada a partir da Equação 9:

$$\rho_S = \frac{M_3 - M_1}{(M_2 + M_3) - (M_1 + M_4)} \quad \text{Equação 9}$$

onde:

$\rho_S$  = Densidade do sólido;

$M_1$  = Massa do picnômetro vazio e seco;

$M_2$  = Massa do picnômetro com água;

$M_3$  = Massa do picnômetro com amostra;

$M_4$  = Massa do picnômetro com amostra e água.

Esse procedimento foi executado em quadruplicata, e com os valores obtidos realizou-se o cálculo da média, de forma a determinar a densidade final do minério de ferro estudado.

Já a caracterização mineralógica por difração de raios X, foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais do CEFET-MG, campus I, no equipamento XRD-7000 da marca *Shimadzu*, com o objetivo de identificar as espécies minerais presentes na amostra de minério de ferro.

Utilizando-se a densidade do minério obtida a partir do método picnométrico e partindo-se do princípio que a amostra era um minério binário, ou seja, constituída basicamente por hematita e quartzo, determinou-se o teor de mineral minério presente na amostra, como representa a Equação 10.

$$\text{Mineral minério (\%)} = \frac{\rho_{MM}(\rho_M - \rho_G)}{\rho_M(\rho_{MM} - \rho_G)} \times 100\% \quad \text{Equação 10}$$

sendo:

$\rho_{MM}$  = densidade do mineral minério (hematita: 5,01 g/cm<sup>3</sup>);

$\rho_M$  = densidade do minério;

$\rho_G$  = densidade da ganga (quartzo: 2,65 g/cm<sup>3</sup>).

### 3.3 ENSAIOS DE MOAGEM

A moagem foi realizada no moinho de bolas modelo jarro de aço, pertencente ao Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) do CEFET-MG, Campus Araxá. A Tabela 4 apresenta as características do moinho.

Tabela 4- Características do moinho de bolas.

Comprimento (cm)	19,30
Diâmetro interno (cm)	14,00
Volume do moinho (m <sup>3</sup> )	2,97x10 <sup>-3</sup>

Inicialmente selecionou-se aleatoriamente 10 bolas do moinho (Figura 11), com o auxílio do paquímetro mediu-se o diâmetro de cada corpo moedor e calculou-se o diâmetro médio das bolas. Tendo-se o diâmetro médio do corpo moedor, obteve-se a velocidade crítica do moinho (Equação 5). Para determinar a velocidade de operação do equipamento, contou-se 10 giros completos realizados pelo moinho de bolas durante 15 segundos.



Figura 11: Moinho e os corpos moedores.

Os corpos moedores foram adicionados ao jarro de forma a obter o fator de enchimento desejado (Equação 6). Com o intuito de obter o volume de vazios presentes entre os corpos, adicionou-se água através de uma proveta graduada de 1000 ml, cobrindo-se os corpos moedores. A diferença entre o



volume inicial de água existente na proveta e o volume final, correspondeu ao volume de vazios presentes entre os corpos.

Para a realização dos testes de moagem, adicionou-se o minério de ferro e a água no jarro em proporções adequadas para as porcentagens de sólidos analisadas, que foram calculadas pela Equação 7. Com o material necessário para os ensaios, colocou-se a tampa e apertou-se o parafuso. Após certificar que a tampa ficou firme ao jarro, ligou-se o equipamento, iniciando a moagem, como representa a Figura 12.



Figura 12: Moinho de bolas.

Vale ressaltar que a porcentagem de sólidos e o fator de enchimento foram fixados em 40% nos dois primeiros experimentos, de forma a determinar o melhor tempo de operação. O melhor tempo obtido foi utilizado para os testes seguintes variando os parâmetros, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Variáveis dos testes de moagem.

<b>Fator de enchimento (%)</b>	<b>Porcentagem de sólidos</b>	<b>Tempo (minutos)</b>
30	25	20
	40	
	55	
	70	
40	25	20
	40	
	55	
	70	
40	40	30

Após executar a moagem durante o tempo estipulado, desligou-se o equipamento, colocou-se o jarro sobre a bancada e aliviou-se a tensão existente no parafuso para retirar a tampa. O material presente no jarro foi removido e despejado em cima de uma peneira de 3/8" para reter os corpos moedores.

Em seguida, para os testes com 25 e 40% de sólidos, realizou-se normalmente o peneiramento a úmido do produto da moagem. Porém observou-se que a massa retida nos ensaios com 40% de enchimento do moinho foi próxima a massa de Gaudin, por isso, para 55 e 70% de sólidos, homogeneizou-se e amostrou-se as polpas dos produtos da moagem, para posteriormente realizar o peneiramento. Os peneiramentos foram realizados em duplicata, assumindo desvio padrão máximo de 5% de material retido em cada peneira.

Ao término do peneiramento, retirou-se a série de peneiras e colocou-se o retido de cada peneira em um prato, estes eram colocados na estufa a 100°C por 24 horas para a secagem do material.

Passado o tempo de secagem, retirou-se os pratos da estufa e pesou-se cada um separadamente, de forma a obter o peso do material retido em cada peneira. Em seguida, construiu-se as curvas de análise granulométrica e

comparou-se os valores da amostra inicial aos do material cominuído. A partir da curva granulométrica, obteve-se o  $A_{80}$  e o  $P_{80}$ , que foram utilizados para determinar a relação de redução descrita pela Equação 8.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este tópico traz os resultados da caracterização tecnológica da amostra, além dos resultados obtidos nos testes de moagem.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

A Tabela 6 apresenta os valores dos ensaios de picnometria da amostra de minério utilizada nos testes de moagem. Os dados detalhados das pesagens dos picnômetros encontram-se no Apêndice A-1.

Tabela 6 - Densidade das amostras.

Picnômetro	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
1	4,01
2	4,00
3	3,91
4	3,95

Tendo como base a Tabela 6, calculou-se a densidade média, o desvio padrão e o coeficiente de variação, sendo respectivamente, 3,97g/cm<sup>3</sup>, 0,05 g/cm<sup>3</sup> e 0,013, o que garante a confiabilidade dos testes.

Correa (2018), também trabalhou com o Itabirito oriundo da Mina de Posse, localizada no município de Caeté, Minas Gerais. A autora analisou os parâmetros para a concentração magnética do minério, para isso, determinou a densidade da alimentação, obtendo 3,92 g/cm<sup>3</sup>. O valor encontrado pela autora foi muito próximo da densidade real média obtida nesse estudo.

A partir da densidade média obtida, determinou-se o teor de hematita, via Equação 14, e o teor de ferro presente na amostra, sendo respectivamente, 70,58% e 49,36%.

A Figura 13 apresenta o resultado da difração de raios-x da amostra.

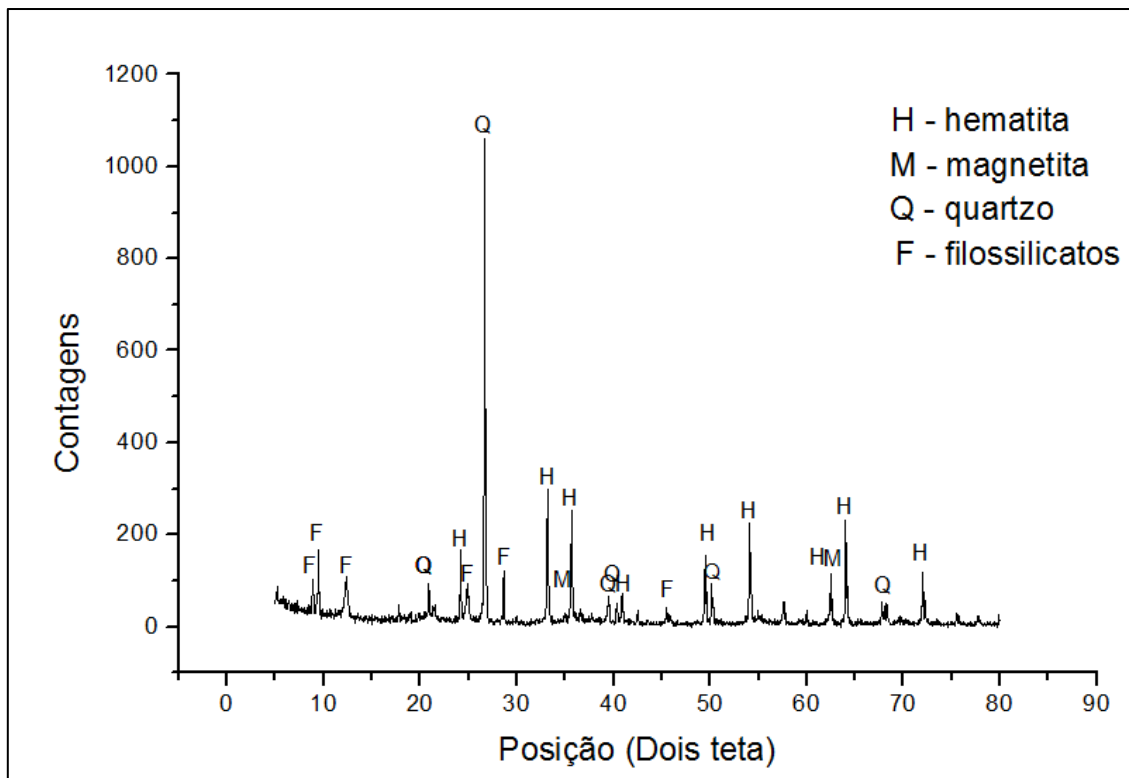


Figura 13: Difratograma da amostra.

Analisando-se a Figura 13, verifica-se picos de quartzo, hematita, alguns traços de filossilicatos e magnetita.

#### 4.2 VELOCIDADE DE OPERAÇÃO DO MOINHO

Aplicando-se na Equação 5 e o valor de 1,52 cm, correspondente ao diâmetro médio dos corpos moedores, obteve-se a velocidade crítica do moinho de 119,49 rpm. O mesmo apresenta velocidade de operação de 40 rotações por minuto, correspondendo a 33,48% da velocidade crítica, portanto possivelmente o equipamento opera no regime de cascata, com a fragmentação ocorrendo por abrasão e atrito, sendo justificado a quantidade de finos presente nos produtos, como é possível verificar no Apêndice A-3.

De acordo com Taggart (1954), a velocidade ideal de operação é 57% da velocidade crítica, pois diminui-se o gasto com energia, revestimento e carga. O moinho do LTM apresenta velocidade de operação muito abaixo da ideal, por isso, a velocidade foi constante durante a realização dos testes.

### 4.3 ENSAIOS DE MOAGEM

As massas de minério e de água utilizadas nos testes encontram-se no Apêndice A-2.

Para calcular a relação de redução, utilizou-se as equações obtidas a partir dos modelos matemáticos de Gates Gaudin Schumann e Rosin Rammler. O modelo matemático elaborado por Rosin Rammler apresentou, em grande parte dos testes, linearização superior ao de Gates Gaudin Schumann, comprovando que este modelo matemático se aplica melhor a finos.

#### 4.3.1 DETERMINAÇÃO DO $A_{80}$

A Figura 14 apresenta a curva da distribuição granulométrica da alimentação do moinho, através dela foi possível determinar a abertura na qual 80% das partículas da alimentação é passante. A tabela para construção dessa curva encontra-se no Apêndice A-3.

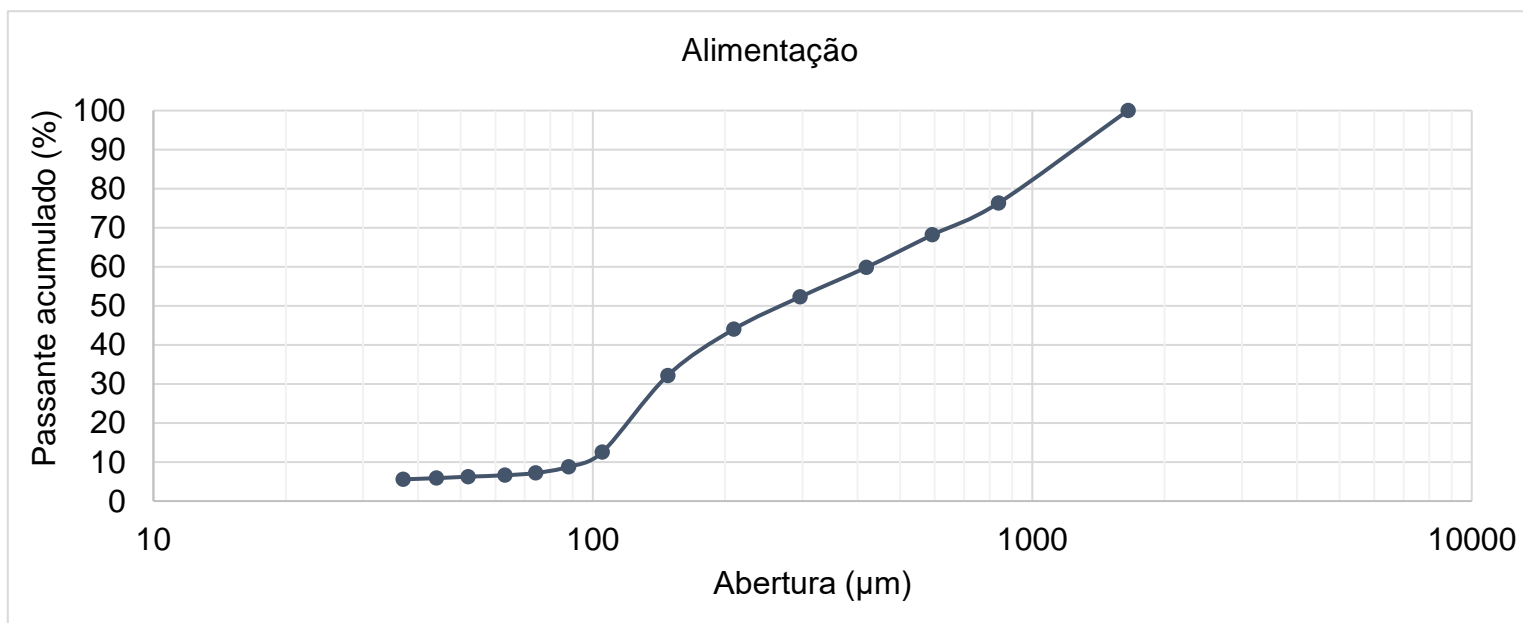


Figura 14: Curva de análise granulométrica da alimentação do moinho.

Analisando-se a curva granulométrica presente na Figura 14, determinou-se o  $A_{80}$  igual a 920  $\mu\text{m}$ .

Para a determinação dos valores do  $A_{80}$  e do  $P_{80}$ , utilizou-se a análise gráfica, visto que, o modelo matemático de Rosin Rammler apresentou em alguns casos valores baixos do coeficiente de determinação ( $R^2$ ),

comprometendo a linearização e o cálculo da relação de redução a partir das equações geradas pelo modelo. As curvas do modelo matemático RR encontram-se no Apêndice A-4.

#### 4.3.2 ANÁLISE DO TEMPO DE MOAGEM

A Figura 15 apresenta as curvas granulométricas dos testes de moagem realizados em 20 e 30 minutos. A tabela para construção dessa curva encontra-se no Apêndice A-3.

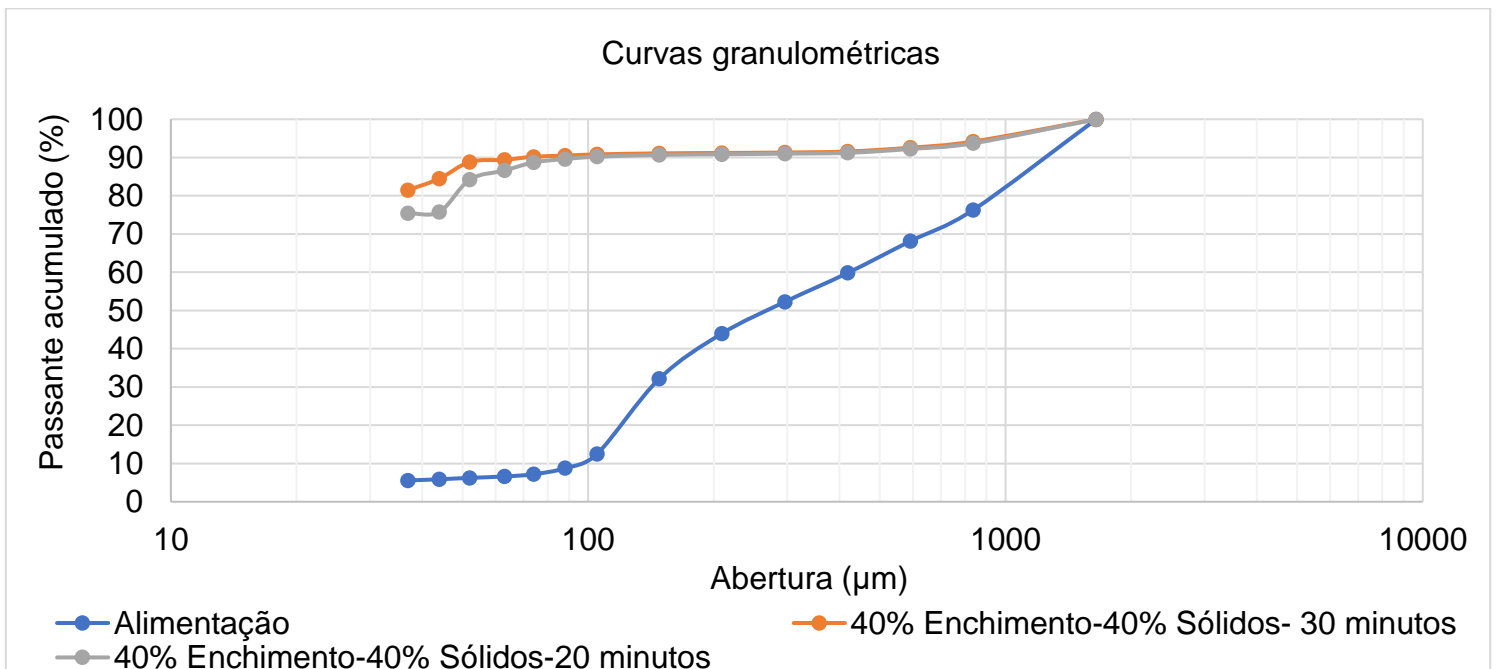


Figura 15: Curvas granulométricas da alimentação e dos testes de moagem realizados durante 20 e 30 minutos.

Através da Figura 15 é possível observar que as curvas granulométricas dos testes realizados em 20 e 30 minutos nas condições de 40% de enchimento e 40% de sólidos foram próximas. Os demais testes foram realizados com o tempo fixo em 20 minutos, pois verificou-se baixa variação na relação de redução ao aumentar o tempo de operação para 30 minutos, ou seja, um aumento de 50% no tempo de moagem não possibilitou uma redução granulométrica expressiva. Além disso, o tempo de 20 minutos é aplicável as aulas laboratoriais e apresenta menor gasto energético.

Tino e Guzzo (2017) analisaram a influência do tempo de moagem na granulometria do produto, variando a duração dos testes em 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480 e 960 minutos e observaram que o material reduzia

consideravelmente até 30 minutos. A partir de 30 minutos de cominuição, os autores verificaram a presença de mecanismos de aglomeração, prejudicando a relação de redução.

Flores *et al.* (2011), estudaram a distribuição granulométrica do produto da moagem, variando o tempo e a carga moedora. Os tempos de operação analisados foram 2, 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120, 240 e 480 minutos. Os autores constataram que as moagens longas, independentemente do tipo de carga moedora, geram o agregamento das partículas mais finas, devido à alta energia de superfície.

#### 4.3.3 TESTES DE MOAGEM COM 30% DE ENCHIMENTO

A Figura 16 apresenta as curvas granulométricas dos testes de moagem realizados com 30% de enchimento. Para construção dessa curva, foram utilizadas as tabelas dos peneiramentos recalculados presentes no Apêndice A-3.

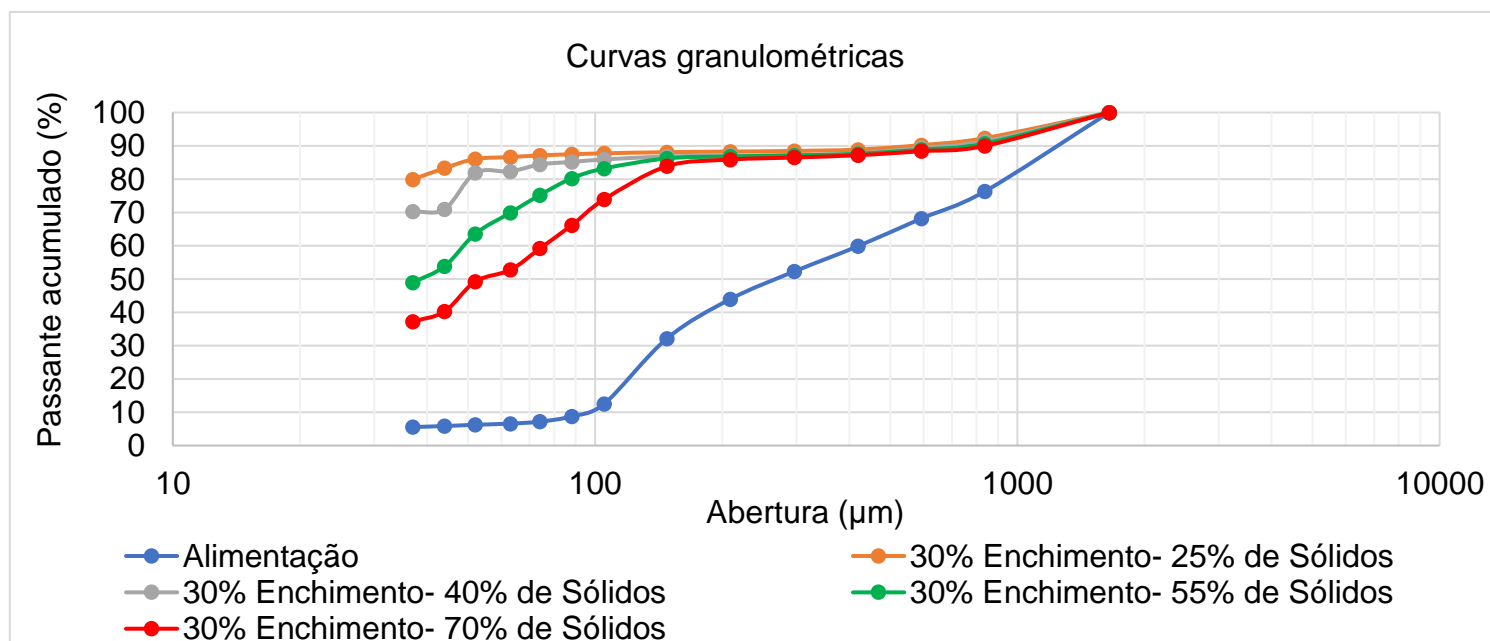


Figura 16: Curvas granulométricas da alimentação e dos produtos da moagem com 30% de enchimento e polpa com diferentes porcentagens de sólidos.

Analisando a Figura 16, nota-se que a curva da alimentação está situada abaixo das demais curvas, pois o seu material apresenta maior granulometria. Outro ponto a se destacar é o fato de as curvas granulométricas dos testes



seguirem uma tendência, com a diminuição da porcentagem de sólidos, verifica-se a diminuição da granulometria do produto.

Os valores de  $P_{80}$  dos produtos das moagens para 30% de enchimento, com a porcentagem de sólidos variando em 25, 40, 55 e 70%, foram respectivamente, 40, 50, 88 e 210  $\mu\text{m}$ .

Tendo-se os valores de  $A_{80}$  e  $P_{80}$  definidos a partir das curvas granulométricas, obteve-se a relação de redução para os testes realizados na condição de 30% de enchimento, como mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Relação de redução para 30% de enchimento.

Teste	Abertura ( $\mu\text{m}$ )	Relação de redução
30% Enchimento-25% Sólidos	40	23
30% Enchimento-40% Sólidos	50	18
30% Enchimento-55% Sólidos	88	10
30% Enchimento-70% Sólidos	210	4

Verifica-se na Tabela 7, que ao aumentar a porcentagem de sólidos a relação de redução diminuiu, isto ocorreu, pois a polpa se torna mais viscosa, diminuindo os choques efetivos entre o corpo moedor e o material.

De acordo com Possa (2002), o aumento da viscosidade aparente da polpa, gera aumento nas tensões limites de escoamento, por isso a relação de redução diminui consideravelmente. Para reduzir a tensão limite de escoamento e aumentar a fluidez da polpa, recomenda-se o uso de dispersantes.

Francioli *et al.* (2015), observou que a diminuição da porcentagem do preenchimento dos vazios, aumenta a possibilidade de fragmentar o material, pois diminui a quantidade de material a ser cominuído, aumentando a chance de as partículas sofrerem impactos. Isto ocorre até um determinado ponto, no qual a diluição é tão grande que a probabilidade de ocorrer choques entre as cargas moedoras e as partículas diminui, reduzindo a relação de redução.

#### 4.3.4 TESTES DE MOAGEM COM 40% DE ENCHIMENTO

A Figura 17 apresenta as curvas granulométricas dos testes de moagem realizados com 40% de enchimento. Para construção dessa curva, utilizou-se as tabelas dos peneiramentos recalculados presentes no Apêndice A-3.

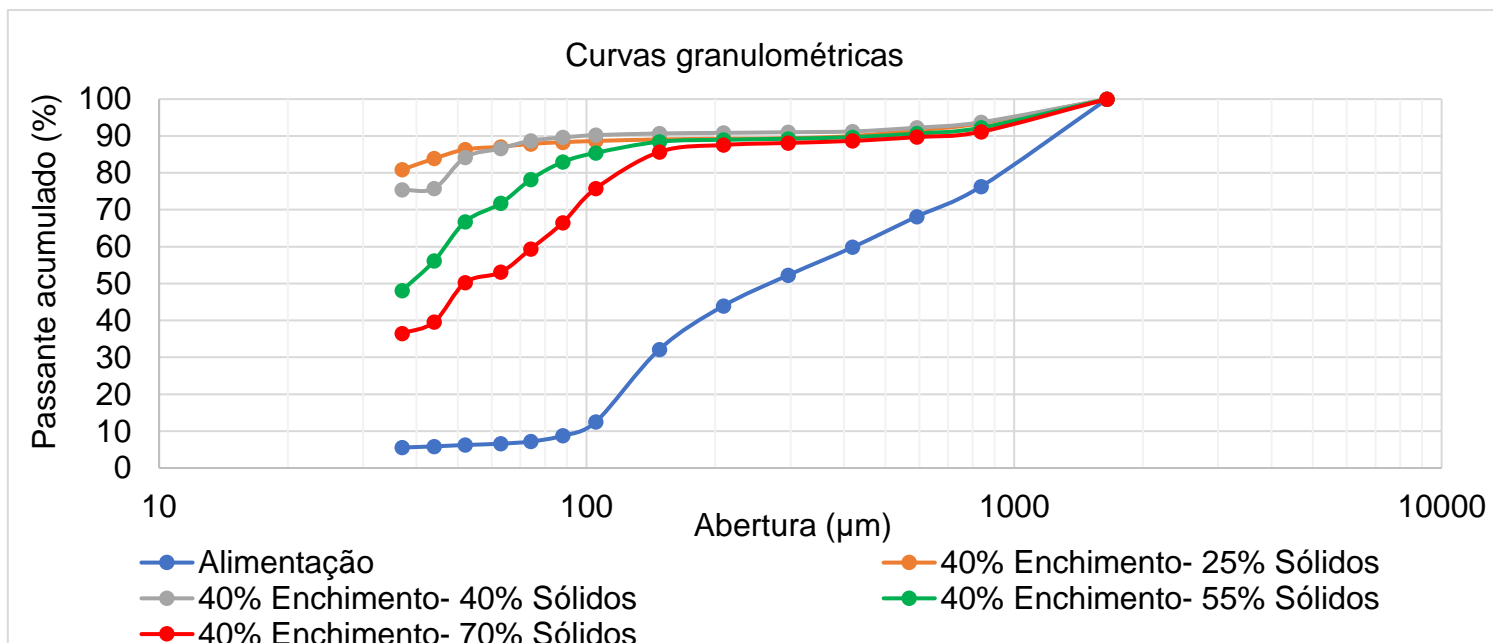


Figura 17: Curvas granulométricas da alimentação e dos produtos da moagem com 40% de enchimento e polpa com diferentes porcentagens de sólidos.

Ao analisar a Figura 17, nota-se que a curva da alimentação está localizada abaixo das curvas dos produtos das moagens, portanto apresenta maior granulometria. Destaca-se o fato de as curvas granulométricas dos produtos seguirem uma tendência, pois ao aumentar a porcentagem de sólidos, diminui-se a relação de redução.

Observando-se a Figura 17, foi possível determinar os valores de  $P_{80}$  para os testes com 40% de enchimento e 25, 40, 55 ou 70% de sólidos, sendo respectivamente, 35, 48, 81 e 128 μm.

Após a definição dos valores do  $A_{80}$  e dos  $P_{80}$  através das curvas granulométricas, calculou-se a relação de redução para os testes efetuados com 40% de enchimento, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8 - Relação de redução para 40% de enchimento.

Teste	Abertura (μm)	Relação de redução
40% Enchimento-25% Sólidos	35	26
40% Enchimento-40% Sólidos	48	19
40% Enchimento-55% Sólidos	81	11
40% Enchimento-70% Sólidos	128	7

Nota-se na Tabela 8, que o aumento da porcentagem de sólidos, gera a diminuição da relação de redução, isto se deve ao fato de a polpa se tornar

mais viscosa, causando a diminuição dos choques efetivos entre a carga moedora e o material.

#### 4.3.5 ANÁLISE DO FATOR DE ENCHIMENTO

Para facilitar a visualização da influência da variável fator de enchimento, plotou-se as curvas granulométricas para as mesmas porcentagens de sólidos, como representa a Figura 18.

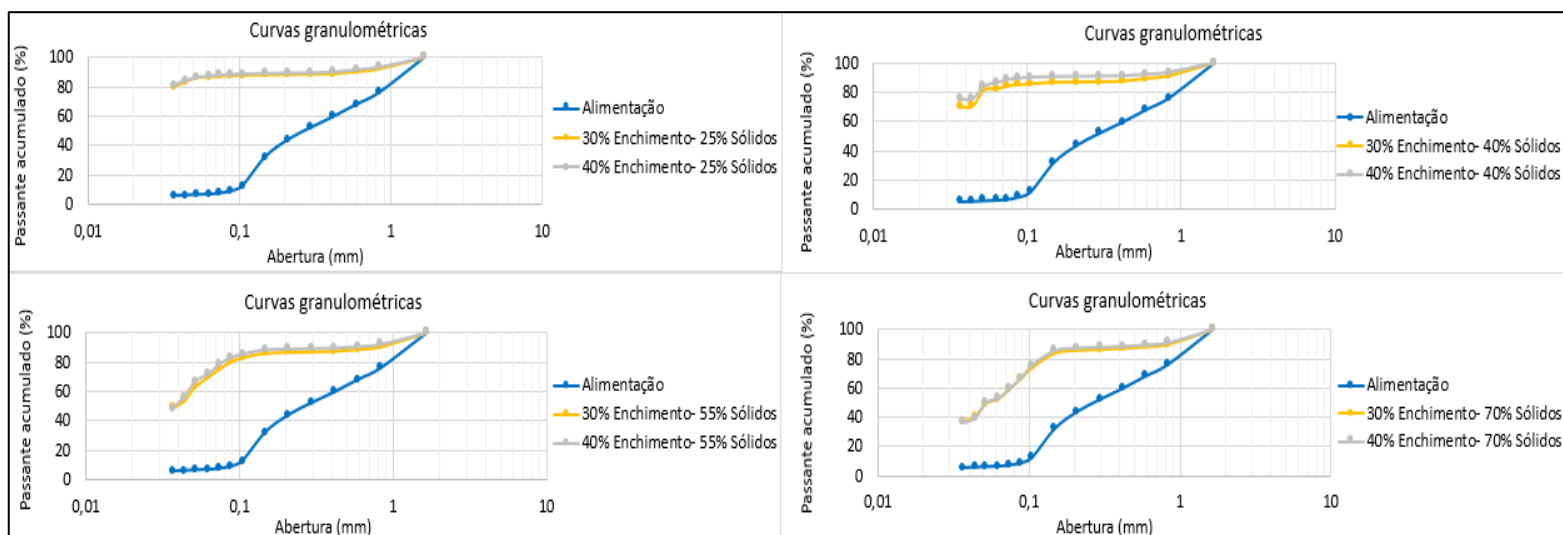


Figura 18: Curvas granulométricas da alimentação e dos produtos tendo como variável o fator de enchimento.

Analisando-se a Figura 18, observa-se que as curvas granulométricas com 30 e 40% de enchimento para todas as porcentagens de sólidos, apresentaram comportamentos semelhantes. Outro ponto a se destacar é nas curvas de 40% de sólidos, que visivelmente apresentaram maior diferença, sendo possível verificar que os testes realizados com 40% de enchimento apresentaram produtos com granulometrias menores, ou seja, os valores de  $P_{80}$  foram inferiores aos obtidos para 30% de enchimento, por isso, as relações de redução dos testes foram superiores para a maior porcentagem de enchimento, como é possível notar nas Tabelas 7 e 8.

Francioli *et al.* (2015), verificou que o aumento do fator de enchimento gerou choques mais intensos entre as partículas, por isso, os ensaios mais eficientes foram com maior fator de enchimento e com corpos moedores apresentando maior diâmetro médio.

#### 4.4 OTIMIZAÇÃO DA MOAGEM

Com as relações de redução obtidas a partir das curvas granulométricas, aplicou-se uma análise estatística das variáveis dos testes, utilizando-se o software Minitab® 2018. A partir do programa, gerou-se o gráfico de efeitos principais, como mostra a Figura 19.

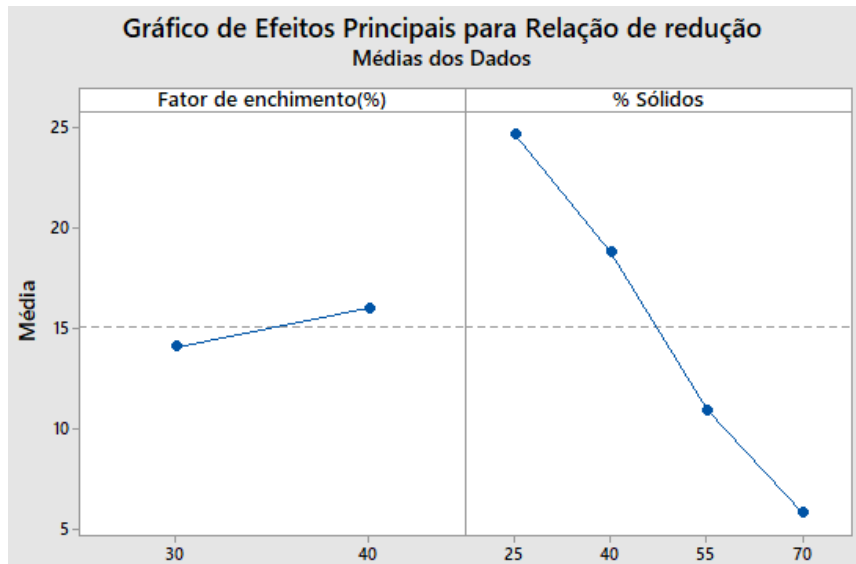


Figura 19: Gráfico da influência das variáveis na relação de redução.

Destaca-se na Figura 19 o aumento do fator de enchimento, gerando um acréscimo na relação de redução, isto se justifica, pois os choques efetivos entre as cargas e o material aumentam consideravelmente. Outro ponto a se destacar é o aumento da porcentagem de sólidos, gerando a diminuição da relação de redução.

De forma a analisar os efeitos das variáveis na relação de redução, plotou-se o gráfico de otimização, como representa a Figura 20.

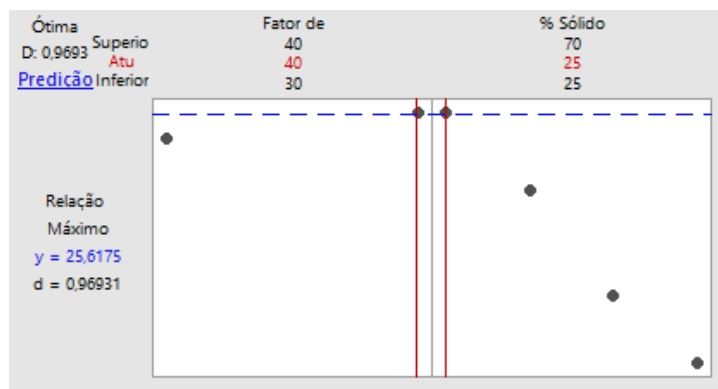


Figura 20: Gráfico da otimização das variáveis.

Nota-se na Figura 20, que os testes realizados com 40% de enchimento e 25% de sólidos obtiveram relação de redução de 26, ou seja, foi a condição que apresentou maior cominuição do material.

Rosa (2013) estudou os moinhos de bolas presentes na Samarco. Os equipamentos apresentavam 70% da velocidade crítica, 30% de enchimento, 80% de sólidos, granulometria da alimentação abaixo de 9,52 mm e relação de redução variando de 28 a 44.

Foggiatto (2009), observou as relações de redução dos moinhos de bolas da Vale em Carajás variando de 100 a 197 para o primeiro moinho e de 117 a 133 para o segundo moinho, com os mesmos operando com 35% de enchimento e 76% da velocidade crítica.

A partir dos trabalhos realizados por Rosa (2013) e Foggiatto (2009), verifica-se o quanto a eficiência do moinho do LTM é prejudicada pela baixa velocidade de operação. Nesses estudos observam-se relações de redução muito altas, e o moinho da Samarco, mesmo operando com 80% de sólidos, apresentava relações de redução superiores se comparadas com as obtidas pelo moinho do Laboratório de Tratamento de Minérios operando com apenas 25% de sólidos.

## 5 CONCLUSÕES

A finalidade deste estudo foi quantificar a operação do moinho do Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, campus Araxá, avaliando as variáveis fator de enchimento e porcentagem de sólidos, objetivando atingir maior relação de redução para o equipamento que opera a 33,48% da velocidade crítica.

Os ensaios de picnometria mostraram que a amostra de itabirito utilizada para os testes de moagem apresentava densidade real de  $3,97 \text{ g/cm}^3$ . Com a densidade real, os teores de hematita e de ferro foram determinados, sendo respectivamente 70,58% e 49,36%. O difratograma, obtido a partir da difração de raios-X, indicou a presença de quartzo, hematita e traços de filossilicatos e magnetita na amostra de itabirito.

Comparando a relação de redução dos testes, a moagem realizada na condição de 40% de enchimento e 25% de sólidos apresentou maior relação de redução, sendo possível concluir que a diminuição da porcentagem de sólidos e o aumento do fator de enchimento geram produtos com menor granulometria.

A condição ótima encontrada para o moinho é inviável industrialmente, pois a diminuição da porcentagem de sólidos, acarreta na diminuição da taxa de alimentação, reduzindo consideravelmente a produção desta etapa de cominuição.

Para melhorar a eficiência da moagem, sugere-se retirar o redutor mecânico, aumentar a polia inferior e reduzir a superior ou trocar o motor por um de maior potência, aumentando a velocidade de operação do equipamento.

## REFERÊNCIAS

- ARAUJO, A.C.; GALERY, R.; VALADÃO, G.E.S.; VIANA, P.R.M. Fragmentação. In: ARAUJO, A.C.; VALADÃO, G.E.S. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. 1 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007. cap.5. p.85-103.
- BERALDO, J.L. **Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1987.
- CARVALHO, P.S.L.; SILVA, M.M.; ROCIO, M.A.R., & MOSZKOWICZ, J. **Minério de Ferro**. 2014.BNDES Setorial, 39, 197-234.
- CHAVES, A.P; PERES, A.E.C. **Teoria e Prática de Tratamento de Minérios: Britagem, Peneiramento e Moagem**. São Paulo. Oficina do texto, 2012. v.3.
- COELHO, C.E.S. (1986) Geologia do Ferro. In: SCHOBENHAUS, C. & COELHO, C.E.S. (coords.). **Principais depósitos minerais do Brasil; ferro e metais da indústria do aço**. Brasília, DNPM. v.2, p. 1-6
- CORREA, A. S. **Estudo dos parâmetros para a concentração magnética do minério de ferro proveniente da mina de Posse-MG**. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Minas e Construção Civil – CEFET MG, Araxá, 2018.
- FLORES, Y.C. **Produção de aditivos minerais finos a nanométricos por moagem de alta energia e avaliação de sua atividade pozolânica**. Dissertação de Mestrado. UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.
- FLORES, Y. C; TOLEDO FILHO, R. D; CORDEIRO, G. C; TAVARES, L.M. **Investigação da moagem ultrafina de quartzo**. In: ENTMME, 24, 2011. Salvador.
- FOGGIATTO, B. **Previsão de desempenho do circuito de moagem de Carajás**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica – USP, São Paulo, 2009.
- FRANCIOLI, D. M; CARVALHO, R. M; TAVARES, L. M. M. **Efeito das variáveis operacionais na moagem descontínua**. In: ENTMME, 26, 2015. Poços de Caldas.
- FURLAN. Moinhos de Bolas/Barras. Disponível em: <[furlan.com.br/moinhos-de-bolas-barras/](http://furlan.com.br/moinhos-de-bolas-barras/)>. Acesso em: 17 de maio de 2018.
- HEIDER, M. **Cenários de produção para o minério de ferro no Brasil em 2030**. In The Mine. 2016.
- JESUS, C.A.G. (2015) Ferro. In: Lima TM (Coord.) **Sumário Mineral**. Brasília, DNPM/MG. p.66-67.
- LUZ, A.B; SAMPAIO, J.A; FRANÇA, S.C.A. **Tratamento de Minérios**. CETEM, Rio de Janeiro – 5ª edição. 2010.

METSO. Britador de mandíbulas. Disponível em: <[www.metso.com/br/produtos/britador-de-mandibulas/britador-mandibulas-nordberg-serie-c/](http://www.metso.com/br/produtos/britador-de-mandibulas/britador-mandibulas-nordberg-serie-c/)>. Acesso em: 17 de maio de 2018.

NASCIMENTO, D.V. **Análise da dinâmica da carga moedora nos moinhos de bolas**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia – UFMG, Belo Horizonte, 2013.

PINHEIRO, J.C.F. **A mineração brasileira de ferro e a reestruturação do setor siderúrgico**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências-UNICAMP, Campinas, 2000.

POSSA, M.V. **A importância da reologia da polpa no beneficiamento de partículas finas por processos de ciclonação e de moagem**. In: ENTMME, 19, 2002. Recife.

ROSA, A.C. **Desempenho dos circuitos de moagem direto e inverso da Samarco**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica – USP, São Paulo, 2013.

SISTEMA INTEGRADO DE INFORMAÇÃO AMBIENTAL (SIAM) PARECER ÚNICO N° 059/2013.

STEELONTHENET. **Steel Plant Information 2017**. Disponível em: <[www.steelonthenet.com/plant.html](http://www.steelonthenet.com/plant.html)>. Acesso em: 16 de maio de 2018.

TAGGART, A.F. **Handbook of Mineral Dressing**. New York, 1954.

TINO, A.A.A; GUZZO, P.L. **Análise das alterações dimensionais e morfológicas da gipsita Johnson processada em moinho planetário**. In: ENTMME, 27, 2017. Belém.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Mineral Commodity Summaries 2019**. Disponível em: <[www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-commodity-summaries](http://www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-commodity-summaries)>. Acesso em: 02 de junho de 2019.



## APÊNDICE A.1- DENSIDADE

Tabela 9 – Testes de picnometria.

Picnômetro	Picnômetro (g)	Picnômetro com amostra (g)	Picnômetro com amostra e água (g)	Picnômetro com água (g)
1	30,28	35,33	84,80	81,01
2	30,89	34,81	84,21	81,27
3	30,77	34,45	84,35	81,61
4	30,29	33,45	83,37	81,01

## APÊNDICE A.2- PARÂMETROS DOS TESTES

Tabela 10 - Parâmetros dos testes.

Fator de enchimento (%)	% de sólidos	Massa de água (g)	Massa de sólidos (g)	Massa de polpa (g)	Densidade da polpa (g/cm <sup>3</sup> )
30	25	230,64	76,88	307,52	1,23
30	40	214,05	142,70	356,75	1,43
30	55	191,15	233,63	424,78	1,70
30	70	157,46	367,40	524,86	2,10
40	25	295,21	98,40	393,61	1,23
40	40	273,99	182,66	456,65	1,43
40	55	244,67	299,05	543,72	1,70
40	70	201,54	470,27	671,81	2,10

## APÊNDICE A.3- ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

Tabela 11 - Análise granulométrica recalculada da alimentação.

Alimentação recalculada							
Mesh	cm	µm	Retido (g)	% Retido	% Retido acumulado	% Passante acumulado	Massa de Gaudin
10	0,1650	1650	0,00	0,00%	0,00%	100,00%	-
20	0,0837	837	48,52	23,70%	23,70%	76,30%	465,26
28	0,0592	592	16,67	8,14%	31,84%	68,16%	267,33
35	0,0419	419	17,02	8,31%	40,15%	59,85%	189,13
48	0,0296	296	15,54	7,59%	47,74%	52,26%	133,76
65	0,0209	209	16,98	8,29%	56,04%	43,96%	94,47
100	0,0148	148	24,18	11,81%	67,85%	32,15%	66,79
150	0,0105	105	40,27	19,67%	87,51%	12,49%	47,33
170	0,0088	88	7,61	3,72%	91,23%	8,77%	36,11
200	0,0074	74	3,23	1,58%	92,81%	7,19%	30,31
230	0,0063	63	1,22	0,59%	93,40%	6,60%	25,63
270	0,0052	52	0,72	0,35%	93,75%	6,25%	21,51
325	0,0044	44	0,78	0,38%	94,13%	5,87%	17,96
400	0,0037	37	0,62	0,30%	94,43%	5,57%	15,15
-400			11,39	5,57%	100,00%	0,00%	
		<b>Total</b>	<b>204,74</b>				

Tabela 12 - Análise granulométrica recalculada da moagem de 20 minutos com 40% de enchimento e 40% de sólidos.

<b>Moagem por 20 minutos com 40% de enchimento e 40% de sólidos</b>							
<b>Mesh</b>	<b>cm</b>	<b>µm</b>	<b>Retido (g)</b>	<b>% Retido</b>	<b>% Retido acumulado</b>	<b>% Passante acumulado</b>	<b>Massa de Gaudin</b>
10	0,1650	1650	0,00	0,00%	0,00%	100,00%	-
20	0,0837	837	11,41	6,27%	6,27%	93,73%	465,26
28	0,0592	592	2,69	1,48%	7,75%	92,25%	267,33
35	0,0419	419	1,87	1,03%	8,77%	91,23%	189,13
48	0,0296	296	0,39	0,21%	8,98%	91,02%	133,76
65	0,0209	209	0,32	0,17%	9,16%	90,84%	94,47
100	0,0148	148	0,28	0,15%	9,31%	90,69%	66,79
150	0,0105	105	0,86	0,47%	9,78%	90,22%	47,33
170	0,0088	88	1,10	0,60%	10,39%	89,61%	36,11
200	0,0074	74	1,63	0,89%	11,28%	88,72%	30,31
230	0,0063	63	3,82	2,10%	13,38%	86,62%	25,63
270	0,0052	52	4,37	2,40%	15,78%	84,22%	21,51
325	0,0044	44	15,33	8,43%	24,21%	75,79%	17,96
400	0,0037	37	0,68	0,37%	24,58%	75,42%	15,15
-400			137,23	75,42%	100,00%	0,00%	
		<b>Total</b>	<b>181,95</b>				

Tabela 13 - Análise granulométrica recalculada da moagem de 30 minutos com 40% de enchimento e 40% de sólidos.

<b>Moagem por 30 minutos com 40% de enchimento e 40% de sólidos</b>							
<b>Mesh</b>	<b>cm</b>	<b>µm</b>	<b>Retido (g)</b>	<b>% Retido</b>	<b>% Retido acumulado</b>	<b>% Passante acumulado</b>	<b>Massa de Gaudin</b>
10	0,1650	1650	0,00	0,00%	0,00%	100,00%	-
20	0,0837	837	10,56	5,82%	5,82%	94,18%	465,26
28	0,0592	592	2,92	1,61%	7,43%	92,57%	267,33
35	0,0419	419	1,80	0,99%	8,42%	91,58%	189,13
48	0,0296	296	0,49	0,27%	8,69%	91,31%	133,76
65	0,0209	209	0,21	0,11%	8,80%	91,20%	94,47
100	0,0148	148	0,20	0,11%	8,91%	91,09%	66,79
150	0,0105	105	0,49	0,27%	9,18%	90,82%	47,33
170	0,0088	88	0,59	0,32%	9,50%	90,50%	36,11
200	0,0074	74	0,54	0,30%	9,80%	90,20%	30,31
230	0,0063	63	1,42	0,78%	10,58%	89,42%	25,63
270	0,0052	52	1,06	0,58%	11,17%	88,83%	21,51
325	0,0044	44	7,91	4,36%	15,53%	84,47%	17,96
400	0,0037	37	5,44	3,00%	18,52%	81,48%	15,15
-400			147,81	81,48%	100,00%	0,00%	
		<b>Total</b>	<b>181,41</b>				

Tabela 14 - Análise granulométrica recalculada da moagem com 30% de enchimento e 25% de sólidos.

<b>Moagem recalculada para 30% de enchimento e 25% de sólidos</b>							
<b>Mesh</b>	<b>cm</b>	<b>µm</b>	<b>Retido (g)</b>	<b>% Retido</b>	<b>% Retido acumulado</b>	<b>% Passante acumulado</b>	<b>Massa de Gaudin</b>
10	0,1650	1650	0,00	0,00%	0,00%	100,00%	-
20	0,0837	837	5,81	7,70%	7,70%	92,30%	465,26
28	0,0592	592	1,58	2,09%	9,79%	90,21%	267,33
35	0,0419	419	1,02	1,35%	11,14%	88,86%	189,13
48	0,0296	296	0,31	0,40%	11,54%	88,46%	133,76
65	0,0209	209	0,15	0,19%	11,73%	88,27%	94,47
100	0,0148	148	0,13	0,17%	11,91%	88,09%	66,79
150	0,0105	105	0,27	0,35%	12,26%	87,74%	47,33
170	0,0088	88	0,21	0,28%	12,54%	87,46%	36,11
200	0,0074	74	0,26	0,34%	12,88%	87,12%	30,31
230	0,0063	63	0,38	0,50%	13,38%	86,62%	25,63
270	0,0052	52	0,45	0,59%	13,97%	86,03%	21,51
325	0,0044	44	2,07	2,74%	16,71%	83,29%	17,96
400	0,0037	37	2,57	3,40%	20,11%	79,89%	15,15
-400			60,26	79,89%	100,00%	0,00%	
		<b>Total</b>	<b>75,42</b>				

Tabela 15 - Análise granulométrica recalculada da moagem com 30% de enchimento e 40% de sólidos.

<b>Moagem recalculada para 30% de enchimento e 40% de sólidos</b>							
<b>Mesh</b>	<b>cm</b>	<b>µm</b>	<b>Retido (g)</b>	<b>% Retido</b>	<b>% Retido acumulado</b>	<b>% Passante acumulado</b>	<b>Massa de Gaudin</b>
10	0,1650	1650	0,00	0,00%	0,00%	100,00%	-
20	0,0837	837	12,23	8,64%	8,64%	91,36%	465,26
28	0,0592	592	2,78	1,96%	10,60%	89,40%	267,33
35	0,0419	419	2,44	1,72%	12,32%	87,68%	189,13
48	0,0296	296	0,68	0,48%	12,80%	87,20%	133,76
65	0,0209	209	0,18	0,13%	12,92%	87,08%	94,47
100	0,0148	148	0,38	0,27%	13,19%	86,81%	66,79
150	0,0105	105	1,28	0,90%	14,09%	85,91%	47,33
170	0,0088	88	1,06	0,75%	14,84%	85,16%	36,11
200	0,0074	74	1,07	0,75%	15,59%	84,41%	30,31
230	0,0063	63	2,95	2,08%	17,68%	82,32%	25,63
270	0,0052	52	0,67	0,47%	18,15%	81,85%	21,51
325	0,0044	44	15,47	10,92%	29,07%	70,93%	17,96
400	0,0037	37	0,88	0,62%	29,69%	70,31%	15,15
-400			99,53	70,31%	100,00%	0,00%	
		<b>Total</b>	<b>141,57</b>				

Tabela 16 - Análise granulométrica recalculada da moagem com 30% de enchimento e 55% de sólidos.

<b>Moagem recalculada para 30% de enchimento e 55% de sólidos</b>							
<b>Mesh</b>	<b>Cm</b>	<b>µm</b>	<b>Retido (g)</b>	<b>% Retido</b>	<b>% Retido acumulado</b>	<b>% Passante acumulado</b>	<b>Massa de Gaudin</b>
10	0,1650	1650	0,00	0,00%	0,00%	100,00%	-
20	0,0837	837	7,99	9,32%	9,32%	90,68%	465,26
28	0,0592	592	1,57	1,83%	11,15%	88,85%	267,33
35	0,0419	419	1,07	1,24%	12,39%	87,61%	189,13
48	0,0296	296	0,42	0,49%	12,88%	87,12%	133,76
65	0,0209	209	0,27	0,31%	13,19%	86,81%	94,47
100	0,0148	148	0,50	0,58%	13,78%	86,22%	66,79
150	0,0105	105	2,61	3,04%	16,81%	83,19%	47,33
170	0,0088	88	2,54	2,96%	19,78%	80,22%	36,11
200	0,0074	74	4,29	5,00%	24,78%	75,22%	30,31
230	0,0063	63	4,57	5,32%	30,10%	69,90%	25,63
270	0,0052	52	5,44	6,34%	36,44%	63,56%	21,51
325	0,0044	44	8,36	9,74%	46,19%	53,81%	17,96
400	0,0037	37	4,19	4,88%	51,07%	48,93%	15,15
-400			41,97	48,93%	100,00%	0,00%	
		<b>Total</b>	<b>85,76</b>				

Tabela 17 - Análise granulométrica recalculada da moagem com 30% de enchimento e 70% de sólidos.

<b>Moagem recalculada para 30% de enchimento e 70% de sólidos</b>							
<b>Mesh</b>	<b>cm</b>	<b>µm</b>	<b>Retido (g)</b>	<b>% Retido</b>	<b>% Retido acumulado</b>	<b>% Passante acumulado</b>	<b>Massa de Gaudin</b>
10	0,1650	1650	0,00	0,00%	0,00%	100,00%	-
20	0,0837	837	12,03	10,03%	10,03%	89,97%	465,26
28	0,0592	592	1,89	1,58%	11,61%	88,39%	267,33
35	0,0419	419	1,46	1,21%	12,82%	87,18%	189,13
48	0,0296	296	0,83	0,69%	13,51%	86,49%	133,76
65	0,0209	209	0,75	0,63%	14,14%	85,86%	94,47
100	0,0148	148	2,39	1,99%	16,13%	83,87%	66,79
150	0,0105	105	11,97	9,99%	26,11%	73,89%	47,33
170	0,0088	88	9,29	7,75%	33,86%	66,14%	36,11
200	0,0074	74	8,36	6,97%	40,83%	59,17%	30,31
230	0,0063	63	7,71	6,43%	47,26%	52,74%	25,63
270	0,0052	52	4,22	3,52%	50,78%	49,22%	21,51
325	0,0044	44	10,77	8,98%	59,76%	40,24%	17,96
400	0,0037	37	3,62	3,02%	62,78%	37,22%	15,15
-400			44,62	37,22%	100,00%	0,00%	
		<b>Total</b>	<b>119,87</b>				

Tabela 18 - Análise granulométrica recalculada da moagem com 40% de enchimento e 25% de sólidos.

Moagem recalculada para 40% de enchimento e 25% de sólidos							
Mesh	cm	µm	Retido (g)	% Retido	% Retido acumulado	% Passante acumulado	Massa de Gaudin
10	0,1650	1650	0,00	0,00%	0,00%	100,00%	-
20	0,0837	837	6,35	6,55%	6,55%	93,45%	465,26
28	0,0592	592	1,83	1,88%	8,43%	91,57%	267,33
35	0,0419	419	1,54	1,58%	10,01%	89,99%	189,13
48	0,0296	296	0,60	0,62%	10,63%	89,37%	133,76
65	0,0209	209	0,13	0,13%	10,76%	89,24%	94,47
100	0,0148	148	0,17	0,18%	10,93%	89,07%	66,79
150	0,0105	105	0,40	0,41%	11,35%	88,65%	47,33
170	0,0088	88	0,34	0,35%	11,70%	88,30%	36,11
200	0,0074	74	0,43	0,44%	12,13%	87,87%	30,31
230	0,0063	63	0,77	0,79%	12,92%	87,08%	25,63
270	0,0052	52	0,71	0,73%	13,65%	86,35%	21,51
325	0,0044	44	2,39	2,46%	16,11%	83,89%	17,96
400	0,0037	37	2,94	3,03%	19,14%	80,86%	15,15
-400			78,43	80,86%	100,00%	0,00%	
		<b>Total</b>	<b>97,00</b>				

Tabela 19 - Análise granulométrica recalculada da moagem com 40% de enchimento e 55% de sólidos.

Moagem recalculada para 40% de enchimento e 55% de sólidos							
Mesh	cm	µm	Retido (g)	% Retido	% Retido acumulado	% Passante acumulado	Massa de Gaudin
10	0,1650	1650	0,00	0,00%	0,00%	100,00%	-
20	0,0837	837	6,70	7,76%	7,76%	92,24%	465,26
28	0,0592	592	1,36	1,57%	9,33%	90,67%	267,33
35	0,0419	419	0,85	0,98%	10,31%	89,69%	189,13
48	0,0296	296	0,38	0,43%	10,74%	89,26%	133,76
65	0,0209	209	0,25	0,29%	11,03%	88,97%	94,47
100	0,0148	148	0,45	0,52%	11,55%	88,45%	66,79
150	0,0105	105	2,62	3,03%	14,58%	85,42%	47,33
170	0,0088	88	2,14	2,47%	17,05%	82,95%	36,11
200	0,0074	74	4,10	4,74%	21,79%	78,21%	30,31
230	0,0063	63	5,60	6,48%	28,27%	71,73%	25,63
270	0,0052	52	4,30	4,98%	33,25%	66,75%	21,51
325	0,0044	44	9,17	10,61%	43,86%	56,14%	17,96
400	0,0037	37	6,94	8,03%	51,89%	48,11%	15,15
-400			41,56	48,11%	100,00%	0,00%	
		<b>Total</b>	<b>86,38</b>				

Tabela 20 - Análise granulométrica recalculada da moagem com 40% de enchimento e 70% de sólidos.

Moagem recalculada para 40% de enchimento e 70% de sólidos							
Mesh	cm	$\mu\text{m}$	Retido (g)	% Retido	% Retido acumulado	% Passante acumulado	Massa de Gaudin
10	0,1650	1650	0,00	0,00%	0,00%	100,00%	-
20	0,0837	837	12,80	8,85%	8,85%	91,15%	465,26
28	0,0592	592	2,09	1,44%	10,29%	89,71%	267,33
35	0,0419	419	1,50	1,03%	11,33%	88,67%	189,13
48	0,0296	296	0,81	0,56%	11,88%	88,12%	133,76
65	0,0209	209	0,80	0,55%	12,43%	87,57%	94,47
100	0,0148	148	2,73	1,89%	14,32%	85,68%	66,79
150	0,0105	105	14,36	9,93%	24,25%	75,75%	47,33
170	0,0088	88	13,38	9,25%	33,50%	66,50%	36,11
200	0,0074	74	10,29	7,11%	40,61%	59,39%	30,31
230	0,0063	63	9,12	6,31%	46,92%	53,08%	25,63
270	0,0052	52	4,05	2,80%	49,72%	50,28%	21,51
325	0,0044	44	15,44	10,68%	60,40%	39,60%	17,96
400	0,0037	37	4,50	3,11%	63,51%	36,49%	15,15
-400			52,76	36,49%	100,00%	0,00%	
<b>Total</b>			<b>144,59</b>				

#### APÊNDICE A.4- CURVAS DO MODELO MATEMÁTICO RR

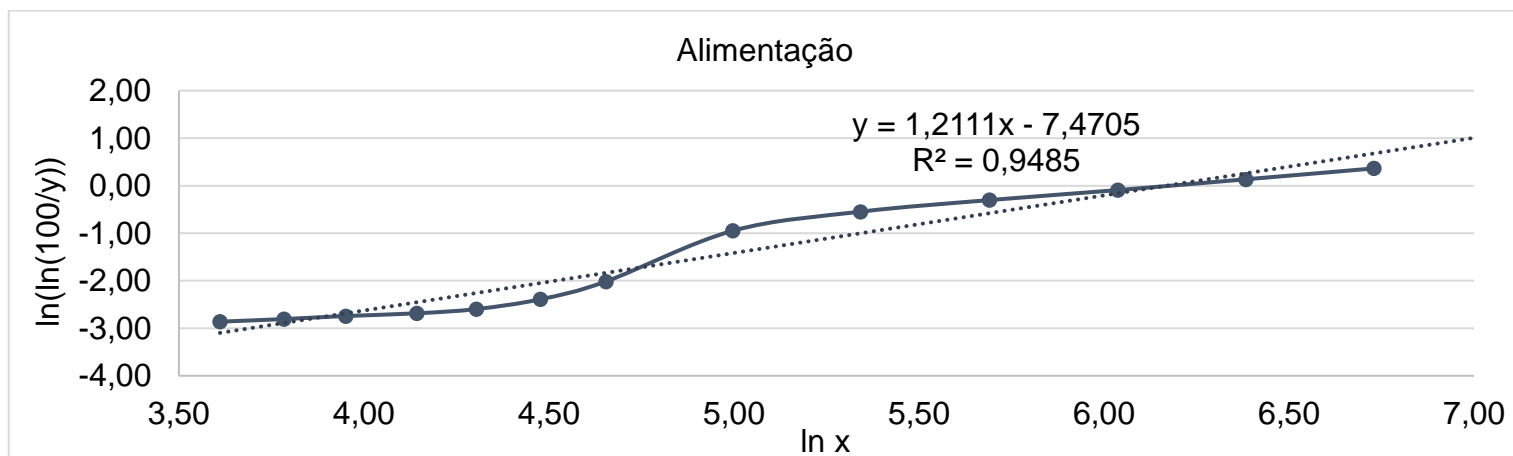


Figura 21: Curva RR da Alimentação.

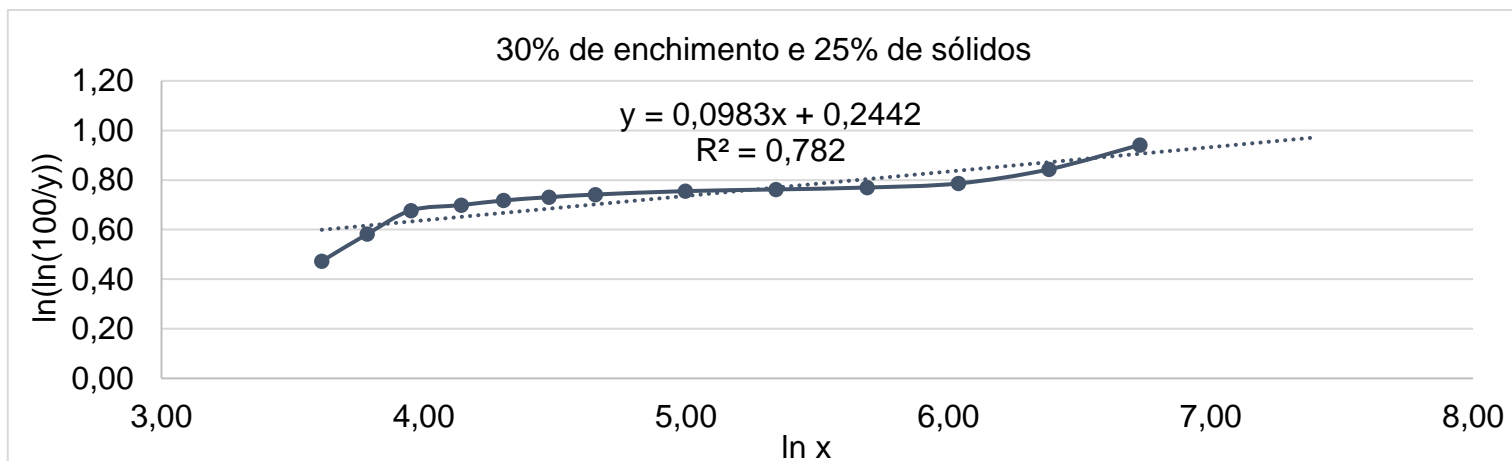


Figura 22: Curva RR para 30% de enchimento e 25% de sólidos.

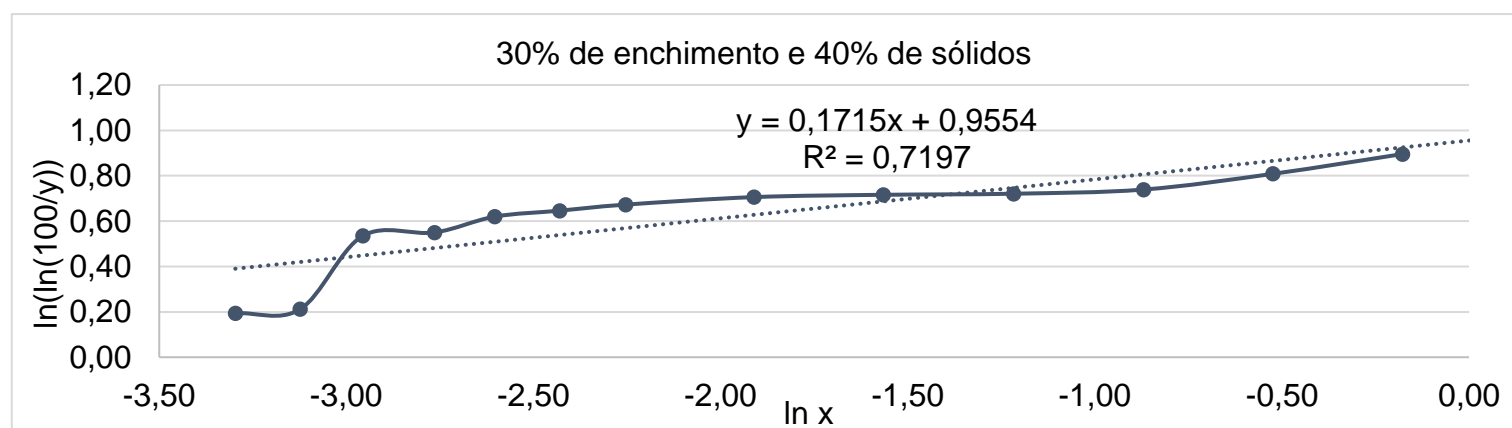


Figura 23: Curva RR para 30% de enchimento e 40% de sólidos.

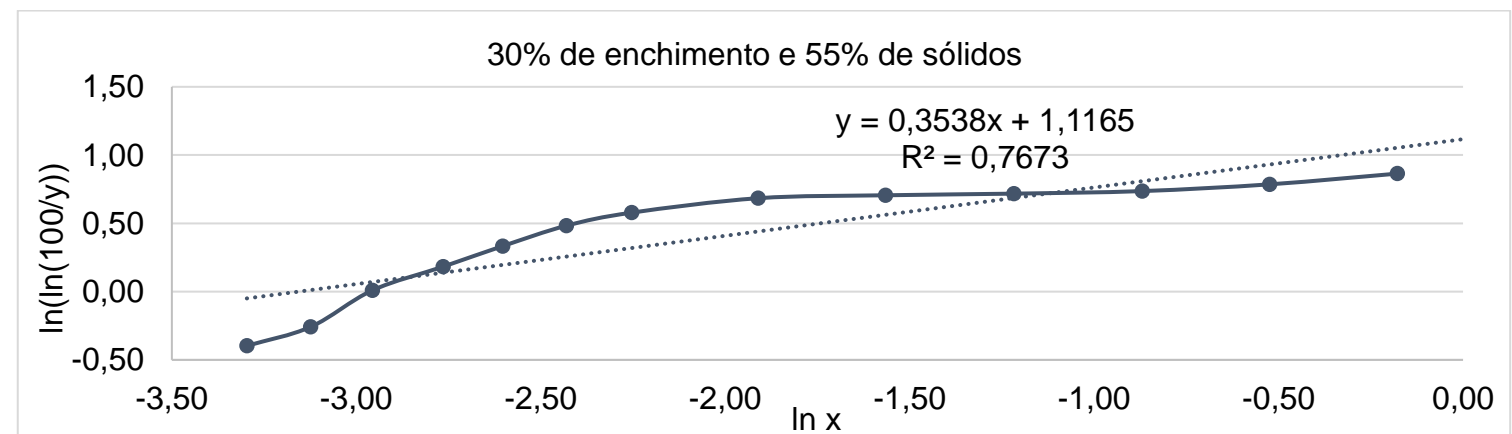


Figura 24: Curva RR para 30% de enchimento e 55% de sólidos.



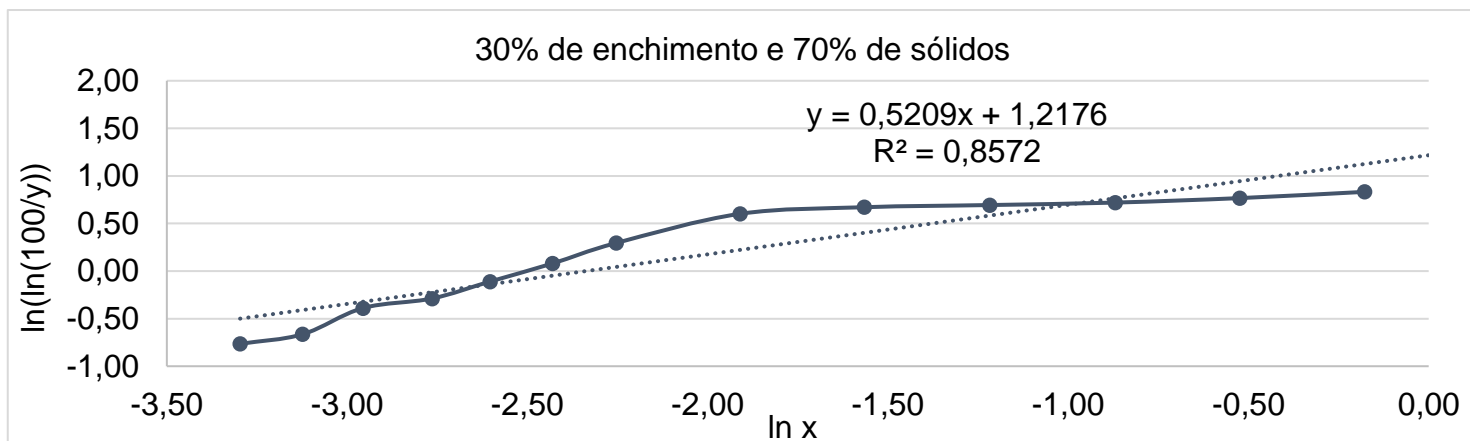


Figura 25: Curva RR para 30% de enchimento e 70% de sólidos.

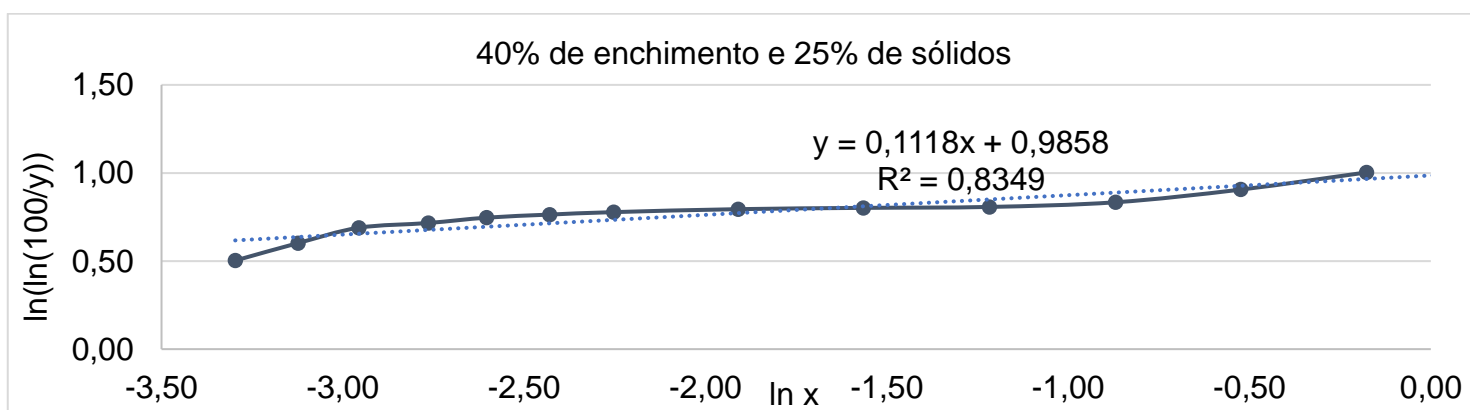


Figura 26: Curva RR para 40% de enchimento e 25% de sólidos.

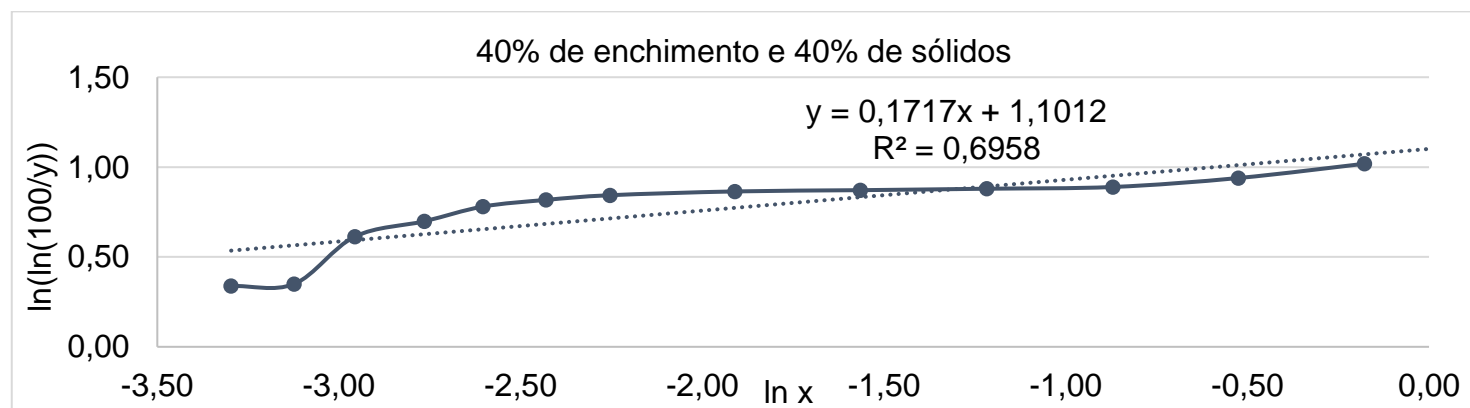


Figura 27: Curva RR para 40% de enchimento e 40% de sólidos.

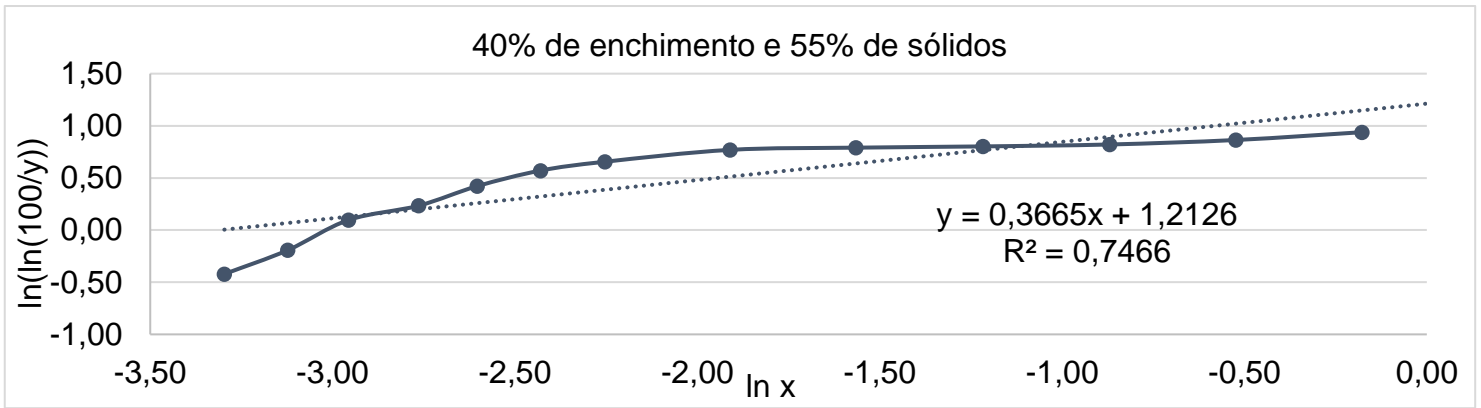


Figura 28: Curva RR para 40% de enchimento e 55% de sólidos.

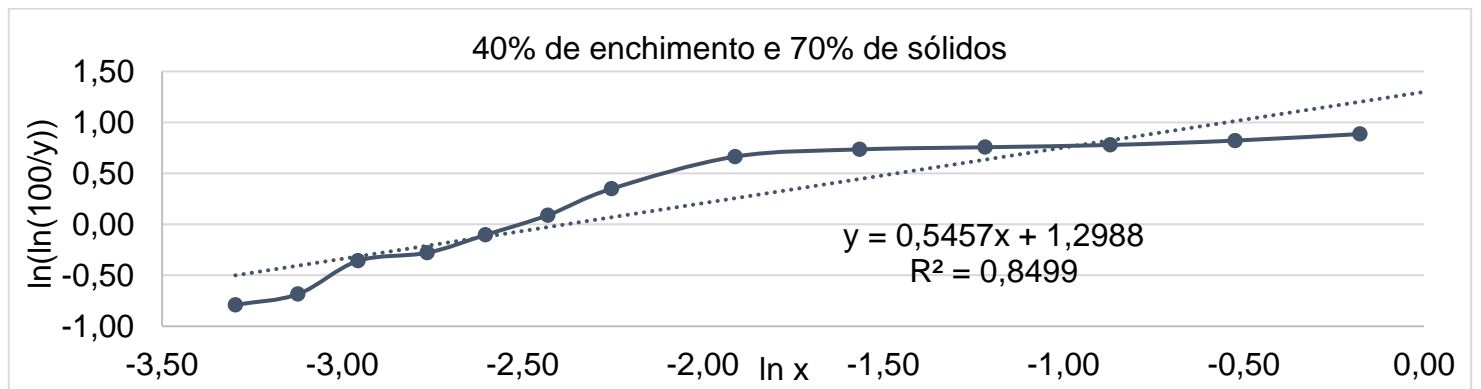


Figura 29: Curva RR para 40% de enchimento e 70% de sólidos.