

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

Avaliação das diferenças entre bolas forjadas e bolas fundidas no processo de
moagem

Autor: Victor Hugo Machado Rodrigues

Orientador: Antônio Eduardo Clark Peres

Fevereiro/2015

Victor Hugo Machado Rodrigues

Avaliação das diferenças entre bolas forjadas e bolas fundidas no processo de
moagem

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Área de Concentração: Tecnologia Mineral. Orientador: Prof. Antônio Eduardo Clark Peres.

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola da Engenharia
2015

DEDICATÓRIA

A meu pai José Erlei Rodrigues.

A minha mãe Marlene das Graças Machado Rodrigues.

A minha esposa Vanessa Cotta Silveira Machado.

A meu irmão César Augusto Machado Rodrigues.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho e, em especial:

À Diretoria da Samarco Mineração S.A, por incentivar o estudo e o desenvolvimento pessoal e profissional de seus empregados.

Ao meu orientador, Prof. Antônio Eduardo Clark Peres, pelos ensinamentos, supervisão acadêmica, profissionalismo e amizade.

A Mauro Carvalho pelo incentivo e, sobretudo, por ter proporcionado condições para a conclusão desse trabalho.

A Elias Fonseca pelos constantes ensinamentos e valiosa orientação profissional.

A Luderson Gustavo Gomes pelo apoio incondicional e participação efetiva na execução deste trabalho.

A Giliard de Oliveira, Alan Castro, Pedro Mendes e Cristiano Lopes pela competente execução dos ensaios e análises.

A Paulo Sérgio de Oliveira, Vanderson Eney, Vinício Augusto e Valdirene Dutra pelo incentivo ao longo desta empreitada.

Aos professores e funcionários do PPGEM/UFMG pelo profissionalismo, competência e amizade ao longo do curso.

A Genaro Marino, Emílio Nascimento e Tarcísio Novaes pela inestimável ajuda.

A PROEX CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro ao PPGEM.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	5
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1	Descrição do processo produtivo Samarco	6
3.1.1	Concentrador I.....	6
3.2	Cominuição mineral.....	11
3.3	Moinho de Bolas.....	12
3.4	Corpos Moedores	14
3.5	Bolas.....	16
3.5.1	Bolas forjadas.....	17
3.5.2	Bolas fundidas.....	19
3.5.3	Bolas forjadas vs. Bolas fundidas.....	21
3.6	Tipos de Desgaste.....	22
3.6.1	Desgaste por abrasão	23
3.6.2	Desgaste por impacto.....	28
3.6.3	Desgaste por corrosão	28
3.7	Tratamentos Térmicos e Desgaste.....	30
4	METODOLOGIA	32
4.1	Testes de Eficiência de Moagem.....	32
4.1.1	Amostragem e preparação da amostra	32
4.1.2	Caracterização da amostra	33
4.1.2.1	Análise química quantitativa.....	35
4.1.2.2	Análise granulométrica.....	35
4.1.3	Ensaio tecnológicos.....	35
4.2	Testes de Desgaste.....	38
4.2.1	Caracterização das bolas	38
4.2.1.1	Análise química	39
4.2.1.2	Análise de Dureza.....	40
4.2.2	Ensaio Tecnológicos.....	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1	Testes de Eficiência de Moagem.....	42
5.1.1	Caracterização da amostra	42
5.1.1.1	Análise química quantitativa	42
5.1.1.2	Análise granulométrica	42
5.1.2	Ensaio tecnológicos.....	43
5.2	Testes de Desgaste.....	48
5.2.1	Caracterização das bolas	48
5.2.1.1	Análise Química	48
5.2.1.2	Análise de dureza.....	49

5.2.2	Ensaio Tecnológico.....	49
6	CONCLUSÕES.....	52
7	RELEVANCIA DOS RESULTADOS	53
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	54
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
10	ANEXOS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Grau de liberação do <i>overflow</i> dos ciclones primários	1
Figura 1.2 - Teor de sílica no concentrado Samarco.....	2
Figura 1.3 - Recuperação metálica do Concentrador I da Samarco.....	2
Figura 3.1 - Fluxograma simplificado do Concentrador I da Samarco.....	11
Figura 3.2 - Velocidade crítica do moinho	13
Figura 3.3 - Forças agindo sobre uma bola em um moinho	14
Figura 3.4 - Potência x grau de enchimento.....	14
Figura 3.5 - Corpos moedores mais empregados	16
Figura 3.6 - Fluxograma do processo produtivo das bolas forjadas	17
Figura 3.7 – Fluxograma do processo produtivo das bolas fundidas	20
Figura 3.8 - Representação esquemática do desgaste de 2 e 3-corpos	24
Figura 3.9 - Abrasivos de sílica (a) angulares (b) arredondados.....	26
Figura 3.10 - Taxa de remoção de material em função do curso de um aço sobre uma lixa abrasiva SiC 220 mesh	27
Figura 4.1 – Fluxograma de execução dos ensaios e processamento dos dados	34
Figura 4.2 – Exemplo de dados de ensaios de moagem plotados	36
Figura 4.3 - Fluxograma de execução dos ensaios e processamento dos dados.	39
Figura 5.1 - Eficiência energética de moagem no Teste I	44
Figura 5.2 - Eficiência energética de moagem no Teste II	46
Figura 5.3 - Eficiência energética de moagem no Teste III	48
Figura 5.4 - Consumo de corpo moedor por hora de moagem e acumulado	51

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 - Especificações químicas e físicas dos dois concentrados produzidos no Concentrador I.....	10
Tabela III.2 - Resultados dos testes de desgastes realizados por Albertin e Moraes (2007).....	22
Tabela III.3 - Dureza de abrasivos, fases ferrosas e carbonetos	25
Tabela III.4 - Taxas de desgaste nos testes de moagem realizados por Chenje et al. (2003).....	29
Tabela IV.1 - Condições de execução do método para a moagem primária	36
Tabela IV.2 - Parâmetros para a realização do teste de desgaste.....	41
Tabela V.1 - Análise química da amostra utilizada nos ensaios.....	42
Tabela V.2 – Análise granulométrica da amostra de alimentação dos testes de moagem	42
Tabela V.3 - Distribuição da carga de bolas fundidas no Teste I	43
Tabela V.4 - Distribuição da carga de bolas forjadas no Teste I	44
Tabela V.5 - Distribuição da carga de bolas fundidas no Teste II	45
Tabela V.6 - Distribuição da carga de bolas forjadas no Teste II	45
Tabela V.7 - Distribuição da carga de bolas fundidas no Teste III	47
Tabela V.8 - Análise química dos corpos moedores	49
Tabela V.9 - Resultados de análise de dureza dos corpos moedores	49
Tabela V.10 - Resultados dos testes de desgaste	50

LISTA DE ABREVIATURAS

CLS – *Concentrate Low Silica*

CNS – *Concentrate Normal Silica*

pH – Potencial hidrogeniônico

GE – Grau de enchimento

RPM – Rotações por minuto

RESUMO

Foram investigadas as diferenças de capacidade moedora e de desgaste entre bolas fundidas e bolas forjadas a partir de ensaios de eficiência de moagem e testes de desgaste em um moinho de 0,3048m x 0,3048m.

A amostra utilizada, denominada alimentação usina, apresentava d_{50} de 210 μ m e teores de 45,49% de ferro e 32,05% de sílica.

Foram três baterias de ensaios de eficiência de moagem para cada tipo de bola, sendo a diferença entre eles a composição da carga de bolas. Os testes de desgaste tiveram duração de vinte horas e utilizou-se apenas um diâmetro de bola.

As bolas forjadas apresentaram maior eficiência energética que as bolas fundidas, ou seja, para uma mesma massa processada, o produto do moinho operando com bolas forjadas apresentou uma granulometria mais fina. As bolas forjadas apresentaram eficiência energética entre 5 a 10% acima daquela das bolas fundidas. Em relação ao desgaste, as bolas forjadas apresentaram um desgaste aproximadamente 30% inferior ao das bolas fundidas. Esta diferença significativa se deve ao fato do desgaste das bolas fundidas ter sido muito acentuado nas primeiras cinco horas do teste, devido à porosidade superficial, inerente ao seu processo de fabricação.

Os resultados desta dissertação facilitarão na tomada de decisões bem como na negociação com os fornecedores de corpos moedores, visando reduzir custos e aumentar a eficiência operacional.

ABSTRACT

The differences in grinding capacity and wear between cast iron balls and forged steel balls was investigated based on grinding efficiency and wear experiments conducted in a mill with dimensions 0.3048m x 0.3048.

The sample utilized, designated as concentrator feed, presented d_{50} of 210 μ m and grades of 45.49% Fe and 32.05% SiO₂.

Three sets of grinding efficiency experiments were conducted for each ball type, the difference consisting in the composition of the balls charge. The wear experiments lasted for twenty hours and one single balls diameter was utilized.

The forged steel balls presented higher energy efficiency, for the same processed weight the product of the mill operating with forged steel balls was finer. The energy efficiency was from 5 to 10% higher than that of the cast iron balls. The forged steel balls presented degree of wear 30% lower than that of cast iron balls. This significant difference is due to the severe wear of cast iron balls during the first five hours of testing, due to the surface porosity, inherent to the manufacture process.

The results of this thesis will contribute to decisions and also in the negotiations with grinding media suppliers, aiming at costs reduction and enhanced operation efficiency.

1 INTRODUÇÃO

A Samarco Mineração é reconhecida entre as usinas de tratamento de minério de ferro pelos excelentes resultados operacionais. Nos últimos anos esses resultados têm sido prejudicados pela diminuição do grau de liberação do minério que alimenta a usina, devido principalmente ao aumento da dureza do minério. As partículas mistas, na etapa de flotação reversa, podem ir para o concentrado ou para o rejeito, dependendo da mineralização, ou seja, da maneira como os grãos dos minerais portadores de ferro estão agregados ao quartzo, reduzindo-se a eficiência dos processos de concentração subsequentes.

A figura 1.1 mostra a média anual do grau de liberação desde 2007 até junho de 2012.

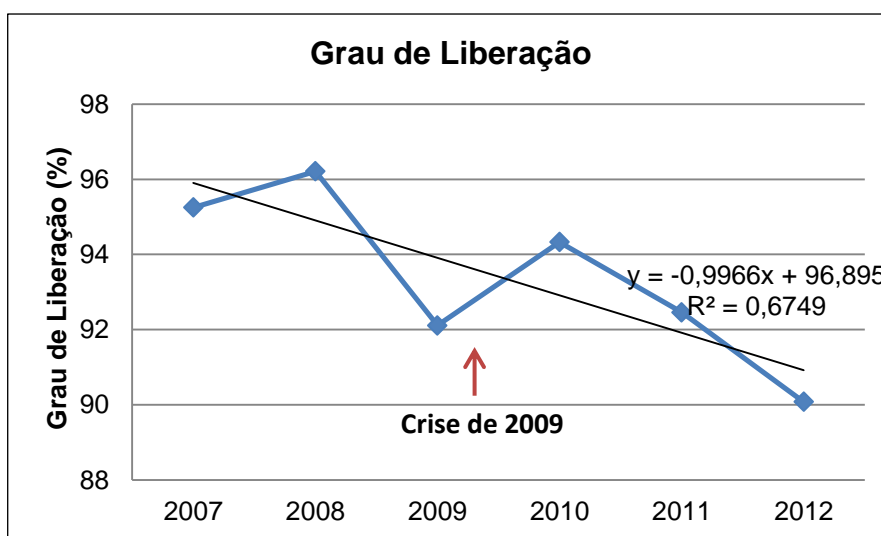


Figura 1.1 - Grau de liberação do *overflow* dos ciclones primários.

A figura 1.2 mostra a média anual do teor de sílica no concentrado Samarco desde 2007 até junho de 2012.

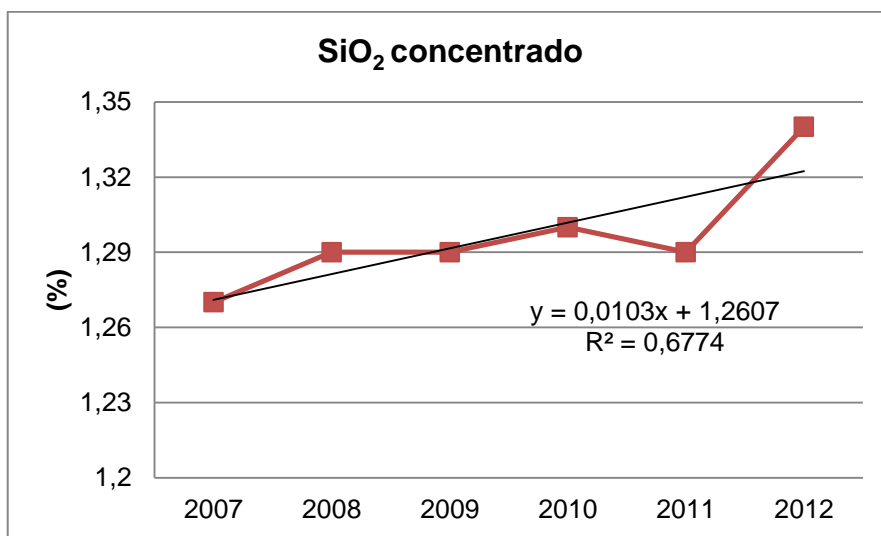


Figura 1.2 - Teor de sílica no concentrado Samarco.

A figura 1.3 mostra a média anual da recuperação metálica da Samarco desde 2007 até junho de 2012.

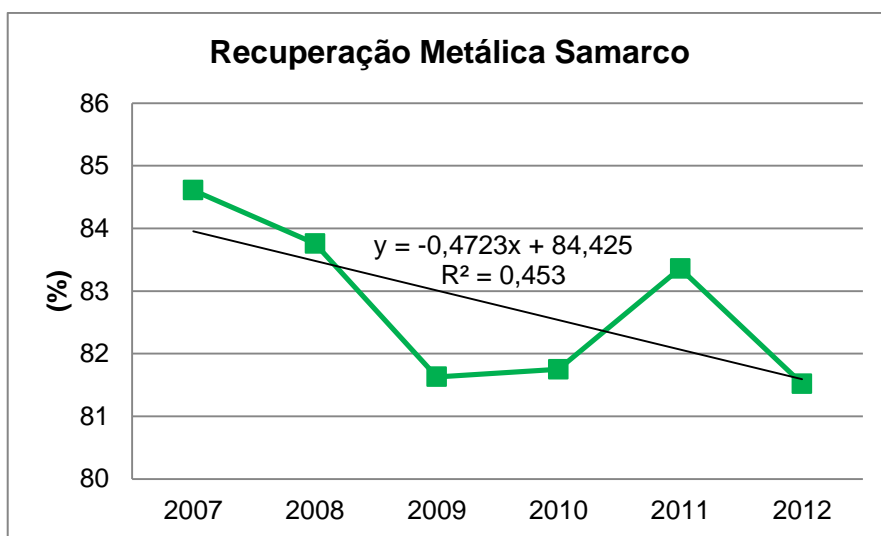


Figura 1.3 - Recuperação metálica do Concentrador I da Samarco.

Para aumentar o grau de liberação é necessário um aumento no consumo de energia nas etapas da britagem e/ou moagem. Existe uma relação direta entre a fragmentação e a liberação, ou seja, quanto maior o grau de redução sofrido pelas partículas maior será a liberação.

Neste estudo o foco será a etapa da moagem, onde será avaliada a possibilidade de aumento da sua potência. Segundo ROWLAND (1982), a potência consumida por moinho de bolas é calculada pela seguinte Equação 1.1:

$$P = 4,879 \times D^{0,3} (3,2 - J) \times \varphi_c \times \left(1 - \frac{0,1}{2^{9-10 \times \varphi_c}} \right) + S \quad (1.1)$$

Onde:

D = diâmetro do moinho em metros;

J = fração de enchimento de carga do moinho;

φ_c = fração da velocidade crítica do moinho.

S = dado pela Equação 1.2:

$$S = 1,102 \times \left(\frac{b - 12,5 \times D}{50,8} \right) \quad (1.2)$$

Onde:

b = tamanho da bola de reposição em polegadas.

SEPÚLVEDA (2006) afirma que a potência é diretamente proporcional à densidade das bolas e, dependendo do processo de fabricação das mesmas, podem não atingir a densidade máxima, característica das bolas forjadas.

A moagem primária do Concentrador I é composta por 6 moinhos, os quais estão com o grau de enchimento máximo. Então, uma das maneiras para aumentar a potência consumida por esses moinhos é aumentar a densidade da carga moedora.

TAGGART (1964) descreve que a carga de corpos moedores é a parte de um moinho que produz trabalho útil. A quantidade de trabalho útil depende da forma dos corpos moedores, do seu tamanho em relação ao tamanho do

material que está sendo moído, da sua quantidade e do material de que eles são feitos.

CLOOS (1983) sugere que o meio moedor deve ter a maior área superficial possível, para prover uma superfície de contato adequada com o material a ser moído e também ser o mais denso possível, para prover a energia necessária para quebrar as partículas do minério. Esses requisitos devem ser balanceados, uma vez que quanto mais pesados os corpos moedores individuais, menor a superfície total exposta, para a mesma massa de corpos moedores.

A massa de corpos moedores usados é função do volume do moinho, da porcentagem enchimento do mesmo e da densidade aparente da carga, inclusive vazios.

A densidade aparente da carga depende da composição química da bola, bem como do seu processo de fabricação. Para as bolas de aço, a densidade aparente possui um valor nominal de 4,65 t/m³.

A densidade aparente é calculada segundo a Equação 1.3:

$$Dens.ap. = (1 - porosidade) \times dens.bola \quad (1.3)$$

As bolas forjadas atingem a densidade teórica máxima do aço de 7,8g/cm³, enquanto as bolas fundidas chegam a 7,65g/cm³.

2 OBJETIVOS

Avaliar se há diferença de capacidade moedora e desgaste entre bolas forjadas e bolas fundidas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Descrição do processo produtivo Samarco

A Samarco foi fundada em 1977 e atualmente é uma empresa controlada igualmente por dois acionistas: Vale S.A. e BHP Billiton. O principal produto é constituído por pelotas de minério de ferro e as etapas do processo produtivo são a lavra, o beneficiamento, o transporte via mineroduto e a pelotização.

A capacidade produtiva de pelotas é 30,50 milhões de toneladas anuais. Esta produção é essencialmente exportada para siderúrgicas situadas nos continentes americano, africano, europeu e asiático.

As unidades industriais situam-se em dois estados brasileiros, Minas Gerais e Espírito Santo, onde as operações são realizadas de forma integrada e simultânea.

No estado mineiro, as operações de lavra, beneficiamento e o início do transporte do concentrado de minério de ferro são realizados na unidade industrial de Germano localizada nas cidades de Mariana e Ouro Preto. O concentrado é transportado via mineroduto, de cerca de 400km, que interliga os municípios de Mariana e Anchieta.

No estado capixaba, as operações de preparação da polpa, pelotização, estocagem e embarque de pelotas são realizadas na unidade industrial de Ponta Ubu situada no município de Anchieta.

3.1.1 Concentrador I

Anualmente são lavradas cerca de 27 milhões de toneladas de minério itabirítico, proveniente das minas de Alegria 1/2/6, Alegria 3/4/5 e Alegria 9. O minério lavrado é transportado por dois sistemas de correias transportadoras

até uma instalação de peneiramento e britagem, a seco, onde a granulometria desse minério é reduzida de -150mm para -12,5mm.

Após a etapa de britagem, o minério é estocado numa pilha com capacidade de 20.000t, de onde é retomado por quatro alimentadores rotativos para o Concentrador I de Germano.

No Concentrador I, o minério inicialmente alimenta o circuito de moagem pré-primária. Esse circuito de moagem pré-primária é constituído por dois moinhos de bolas de 5,18m de diâmetro por 8,53m de comprimento, operando em circuito aberto, a 74% da velocidade crítica, com 36% de enchimento e potência de 3800kW. O tamanho das partículas na alimentação da moagem pré-primária é de 55% passante em 149 μ m e o produto dessa etapa possui uma granulometria de 88% passante em 147 μ m e alimenta o circuito de moagem primária.

O circuito de moagem primária é composto por quatro moinhos de bolas que operam em circuito fechado reverso com quatro baterias de ciclones. Cada um dos moinhos primários possui 4,27m de diâmetro por 5,18m de comprimento, operando a 71,5% da velocidade crítica, 38% de enchimento e potência de 1.430kW. Cada bateria possui seis ciclones de 660,4mm (26 polegadas) de diâmetro.

O *overflow* dos ciclones primários constitui o produto das etapas de moagem pré-primária e moagem primária e possui aproximadamente 12 a 15% de material com granulometria superior a 149 μ m. Dessa forma, as fases mineralógicas encontram-se liberadas e no tamanho adequado para o processo de flotação.

Após as etapas de pré-moagem e moagem primária, o minério é deslamado em três estágios de ciclonagem, constituídos por baterias de ciclones com

diâmetros de 380mm (15 polegadas), 254mm (10 polegadas) e 101,6mm (4 polegadas).

Para obter-se uma deslamagem eficaz, adiciona-se hidróxido de sódio à polpa para elevação do pH. O grau ótimo de dispersão da polpa ocorre em uma faixa de pH entre 9,0 e 9,5.

A lama usina (*overflow* do segundo e do terceiro estágio de ciclonação) é direcionada para os espessadores de lamas. O *underflow* do segundo estágio segue para a etapa de flotação mecânica e o *underflow* do terceiro estágio segue para a etapa de flotação em coluna.

A etapa de flotação mecânica, denominada flotação convencional, possui quatro linhas independentes, sendo cada linha constituída por: um condicionador primário; um condicionador secundário; um banco *rougher*, com quatro células; um banco *cleaner*, com três células; um banco *scavenger*, com quatro células e um banco *re-cleaner*, com três células. Cada célula possui um volume de 14,16m³ (500ft³). Essa etapa do processo inicia-se com o condicionamento, nos condicionadores primário e secundário, do minério proveniente do *underflow* do segundo estágio da deslamagem com o amido de milho ou mandioca gelatinizado.

O condicionador secundário alimenta, por transbordo, o banco *rougher*. Nesse ponto é adicionada a amina, que atua como espumante e coletor das partículas de quartzo. O *underflow* das células *rougher* alimenta a etapa *cleaner*. O *underflow* das células *cleaner* alimenta o banco *re-cleaner*. O *underflow* do banco *re-cleaner* é o concentrado final da etapa de flotação mecânica. O *overflow* das etapas *rougher* e *cleaner* alimenta a etapa *scavenger*. O *underflow* da etapa *scavenger* e o *overflow* da etapa *re-cleaner* retornam na alimentação da etapa *rougher*. O *overflow* da etapa *scavenger* constitui o rejeito final da flotação mecânica.

O concentrado do circuito de células mecânicas alimenta três baterias de ciclones de 254mm (10 polegadas) de diâmetro. O *underflow* desses ciclones alimenta três moinhos de bolas que operam em circuito aberto. Esses moinhos têm 5,18m x 10,36m e potência instalada de 6000HP. As descargas dos moinhos, juntamente com o *overflow* dos ciclones, alimentam o circuito de células mecânicas de grande volume (*tank cell*).

O circuito de células de grande volume é composto por três células de 160m³ cada, sendo uma *rougher*, uma *cleaner* e uma *re-cleaner*. O *underflow* da célula *re-cleaner* constitui o concentrado final dessa etapa. A etapa *scavenger* é realizada em uma coluna com dimensões de 2,44m de diâmetro por 11m de altura e volume de 51,35m³. Essa coluna *scavenger* é alimentada pelo *overflow* das etapas *rougher* e *cleaner*. O rejeito *scavenger* constitui o rejeito final do circuito de células de grande volume. O concentrado *scavenger* e o rejeito *re-cleaner* retornam na alimentação das células mecânicas de grande volume.

O *underflow* do terceiro estágio de deslamagem alimenta três colunas com dimensões de 6m x 3m x 13,6m e volume de 244m³. O *underflow* dessas colunas alimenta outras duas colunas com dimensões de 6m x 3m x 13,6m e volume de 244m³. O *underflow* dessas duas colunas alimenta uma quarta célula de grande volume de 160m³. O *underflow* dessa célula, juntamente com o concentrado do circuito de células de grande volume, alimenta três colunas de 3,7m de diâmetro por 13,6m de altura e volume de 140m³. O *underflow* dessas três colunas constitui o concentrado final do circuito de flotação em colunas e o *overflow* dessas três colunas é encaminhado para as três colunas com dimensões de 6m x 3m x 13,6m e volume de 244m³. O *overflow* das duas colunas com dimensões de 6m x 3m x 13,6m e volume de 244m³ e o *overflow* da quarta célula de grande volume de 160m³ alimentam um tanque condicionador, onde é adicionado amido, e então alimenta dois estágios de flotação em coluna (*rougher* e *cleaner*) com dimensões 4m x 3m x 12m e 3m x 2m x 12m, respectivamente. O rejeito do primeiro estágio é rejeito final, o rejeito do segundo estágio retorna no tanque condicionador e o concentrado do

segundo estágio é encaminhado para as três colunas com dimensões de 6m x 3m x 13,6m e volume de 244m³.

O concentrado final do circuito de flotação em colunas alimenta três baterias de ciclones, cada bateria com dezesseis ciclones de 254mm (10 polegadas) de diâmetro. O *overflow* dessa ciclonagem é concentrado final e vai alimentar os espessadores de concentrado. O *underflow* é dividido para três caixas que alimentam outras três baterias de ciclones, cada bateria com dez ciclones de 354mm (10 polegadas) de diâmetro. Essas baterias fecham o circuito com três moinhos de bolas de 5,18m x 10,36m e potência instalada de 6000HP. O *overflow* é concentrado final e também vai alimentar os espessadores de concentrado e o *underflow* de cada bateria retorna para o respectivo moinho.

O concentrado final é espessado em dois espessadores de 41m de diâmetro. O *underflow* dos espessadores, com aproximadamente 71% de sólidos, é transferido para os tanques de estocagem do mineroduto. A água recuperada no *overflow* desses espessadores, assim como a água recuperada nos espessadores de lama, é bombeada para o tanque de água de processo.

A capacidade anual do Concentrador I de Germano é de 13,5 milhões de toneladas de concentrado. As especificações químicas e físicas dos dois concentrados produzidos no Concentrador I da Samarco podem ser visualizadas na Tabela 3.1.

Tabela III.1 - Especificações químicas e físicas dos dois concentrados produzidos no Concentrador I

<i>Pellet feed</i>	SiO_2 (Max) (%)	P (Max) (%)	+74 μm (Max) (%)	-44 μm (Min) (%)	Blaine (cm ² /g)
CNS	1,65	0,050	3,5	87,2	1500 - 1850
CLS	1,13	0,043	3,5	87,2	1500 - 1850

O fluxograma simplificado do Concentrador I da Samarco é apresentado na figura 3.1.

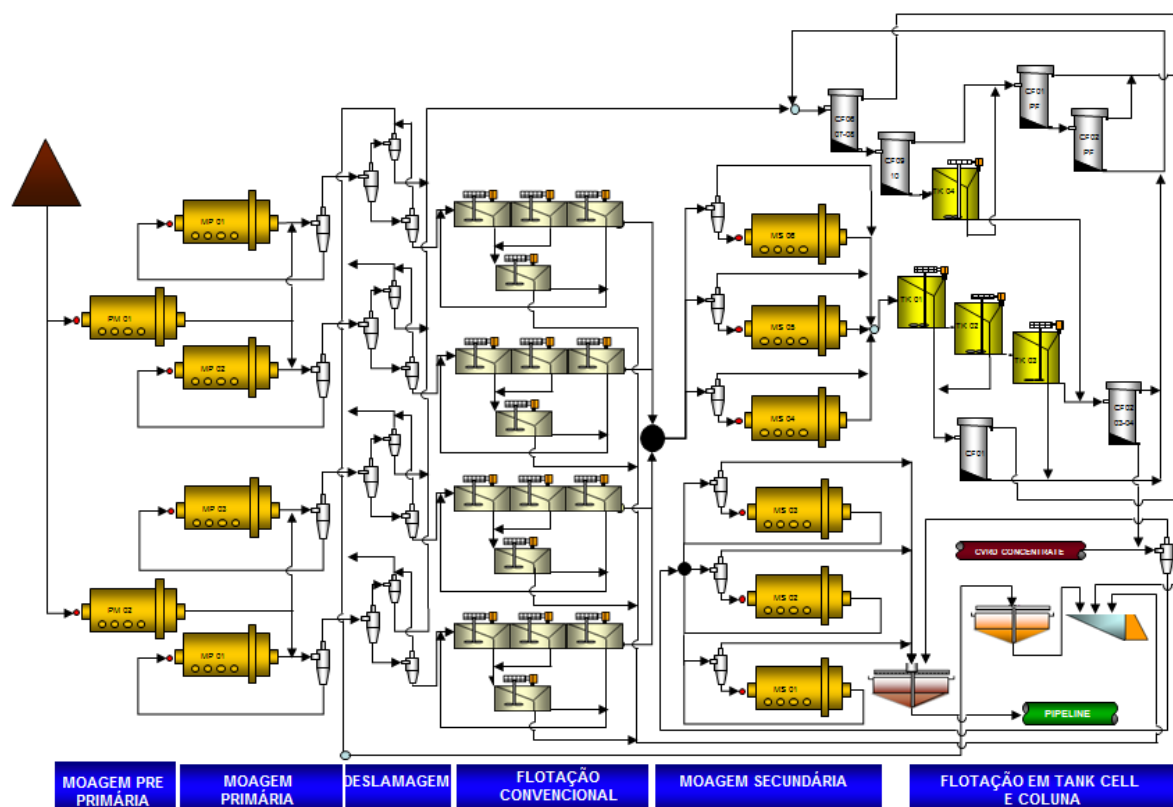


Figura 3.1 - Fluxograma simplificado do Concentrador I da Samarco.

3.2 Cominuição mineral

A cominuição de partículas minerais se faz necessária para garantir as características físicas para os processos de concentração e transporte. A detonação, britagem e moagem constituem as etapas de fragmentação dos minérios.

Nos processos de concentração, a cominuição possui duas finalidades: liberar o mineral-minério dos minerais de ganga e aumentar a área superficial específica dos minerais de um minério facilitando a ação dos reagentes químicos.

A área de interesse deste estudo é a moagem utilizando moinhos de bolas por descarga de *overflow*. Os mecanismos de fratura decorridos nesta etapa, segundo BERALDO (1987), são: abrasão, compressão e impacto.

A abrasão ocorre quando a força é insuficiente para provocar uma fratura em toda a partícula. Há a concentração local de esforços, que provoca o aparecimento de pequenas fraturas, com o surgimento de uma distribuição granulométrica de partículas finas ao lado da partícula original, cujo diâmetro é pouco diminuído. Esse tipo de fratura pode ser provocado por atrito entre as partículas ou de bolas com as partículas.

A compressão ocorre quando a força é aplicada de forma lenta e permite que, com o aparecimento da fratura, o esforço seja aliviado. Assim, a força é pouco superior à resistência da partícula. Desse tipo de fratura resultam poucos fragmentos de grande diâmetro. Esse tipo de fratura ocorre em moinhos quando as partículas são comprimidas entre dois ou mais corpos moedores, ou partículas maiores.

O impacto ocorre quando a força é aplicada de forma rápida e em intensidade muito superior à resistência da partícula, como acontece, por exemplo, em moinhos, nas zonas de queda das bolas. Resulta dessa fratura uma distribuição granulométrica de partículas finas.

3.3 Moinho de Bolas

Os moinhos cilíndricos de bolas são, de acordo com FIGUEIRA *et al.* (2010), constituídos de uma carcaça cilíndrica de ferro, revestida internamente com placas de aço ou borracha, que gira sobre mancais e contém no interior uma carga solta de bolas de ferro ou aço.

Ainda segundo FIGUEIRA *et al.* (2010), os corpos moedores são elevados pelo movimento da carcaça até certo ponto de onde caem, seguindo uma trajetória parabólica, sobre as outras bolas que estão na parte inferior do cilindro e sobre o

minério que ocupa os interstícios das bolas. As bolas acompanham o movimento da carcaça e, impelidas pela força centrífuga, percorrem uma trajetória circular (Figura 3.2). Enquanto a força centrífuga for maior que a força da gravidade, as bolas permanecem nessa trajetória. No momento que o componente da força da gravidade que se opõe à força centrífuga for maior que esta, as bolas abandonam a trajetória circular e passam a seguir uma trajetória parabólica.

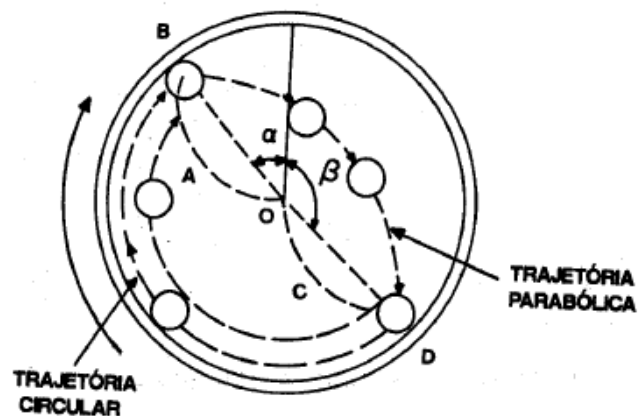


Figura 3.2 - Velocidade Crítica do Moinho.

Fonte: FIGUEIRA *et al.* (2010)

Há, entretanto, um momento em que as duas forças se igualam e marca o início da queda da bola (Figura 3.3). Nesse momento tem-se:

$$F_c = F \times \cos \alpha \quad (3.1)$$

Sendo: F a força centrífuga e $F \cos \alpha$ a componente da gravidade.

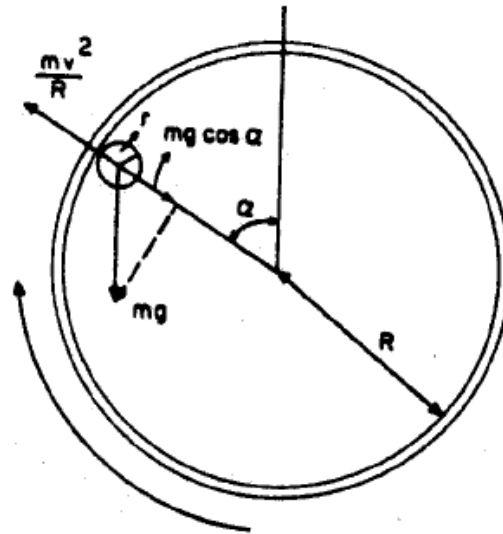


Figura 3.3 - Forças agindo sobre uma bola em um moinho.
Fonte: FIGUEIRA *et al.* (2010)

3.4 Corpos Moedores

A fragmentação se dá através da movimentação dos corpos moedores no interior do moinho. O volume da carga (ou enchimento) é de 35 a 50% do volume interno do moinho. A Figura 3.4 mostra o comportamento da potência com o aumento do grau de enchimento, referente ao moinho primário do Concentrador I.

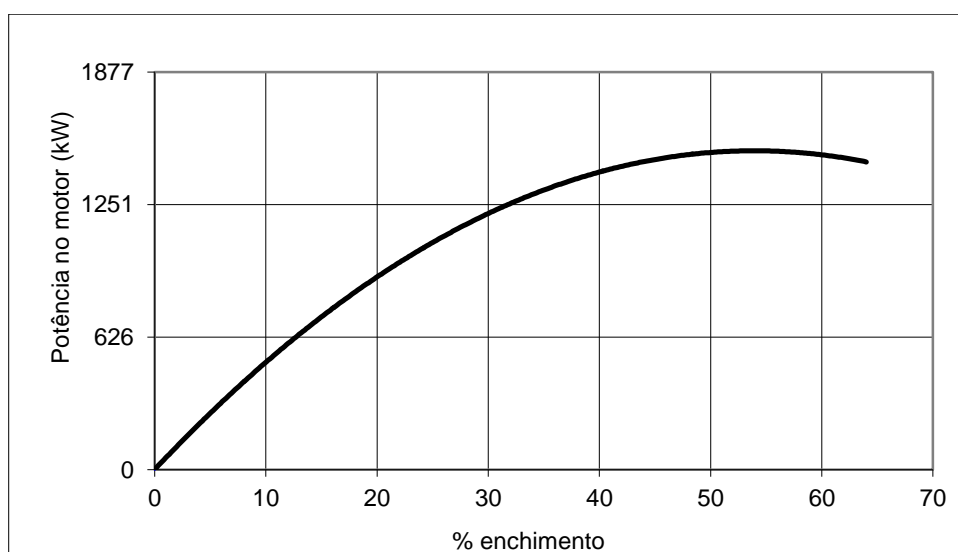


Figura 3.4 - Potência x grau de enchimento
Fonte: Manual Polysius

O volume da carga é calculado pela equação 3.2:

$$V = 113 - 126 \times \frac{H_C}{D_M} \quad (3.2)$$

Em que:

V: volume da carga, em fração

H_C : distância do topo do moinho ao topo da carga em repouso, em m

D_M : diâmetro do moinho, em m

A massa de corpos moedores usados é função do volume do moinho, da porcentagem de carga do mesmo e da densidade aparente da carga, inclusive vazios.

A densidade da carga de bolas é independente do diâmetro do moinho e apresenta alguma variação em função da distribuição granulométrica da carga.

A massa de corpos moedores é calculada pela equação 3.3:

$$T = 0,785 \times D^2 \times L \times \rho \times V \quad (3.3)$$

Em que:

T: carga de corpos moedores, em kg

D: diâmetro médio do moinho interno ao revestimento, em m

L: comprimento da câmara do moinho, em m

ρ : densidade aparente da carga, em kg/m³

V: volume da carga, em fração

A carga de corpos moedores é o componente de um moinho que produz trabalho útil. A quantidade de trabalho útil depende da forma dos corpos moedores, do seu tamanho em relação ao tamanho do material que está sendo

moído, da sua quantidade e do material de que eles são feitos (TAGGART, 1964).

Os corpos moedores mais frequentemente utilizados são cilindros, cylpebs (trancos de cone) e bolas, podendo ser usados, entre outros, seixos ou pedaços do próprio material a ser moído (KRÜGER, 2004). Na Figura 3.5 são mostrados esses corpos mais empregados.

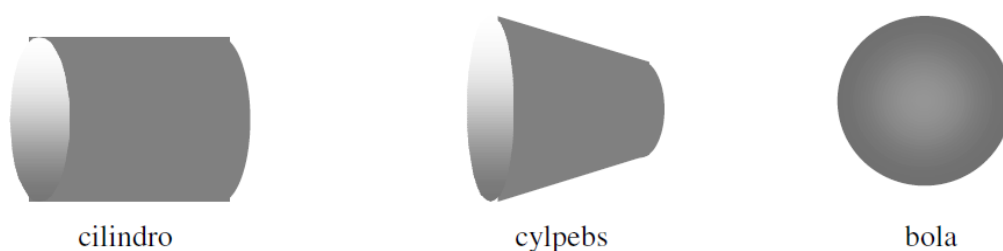


Figura 3.5 - Corpos moedores mais empregados.
Fonte: KRÜGER (2004)

Os moinhos operam continuamente e são feitas reposições das bolas consumidas, em determinados intervalos de tempo, de tal forma que seja mantida a carga de bolas no interior do moinho. As bolas desgastadas são expulsas do interior do moinho pelo próprio fluxo do material moído. Normalmente a expulsão ocorre quando as bolas atingem diâmetro inferior a 15mm (KRÜGER, 2004).

3.5 Bolas

As bolas são fabricadas de aço forjado ou fundido, ou de ferro fundido ligado. A qualidade depende muito do tratamento térmico e varia significativamente entre os vários fornecedores.

Normalmente, considera-se que a vida útil da bola é tanto mais longa quanto maior a dureza, desde que ela não seja muito frágil. O tratamento térmico adequado distribui a dureza convenientemente em uma seção transversal. As bolas devem ter uma dureza que não diminua muito na parte interna em

relação à dureza superficial; por outro lado, para que ela tenha tenacidade suficiente é necessário que seu núcleo seja mais brando.

A dureza superficial corresponde a medições de dureza na superfície da bola. A dureza volumétrica corresponde à média de várias medições ao longo do raio da bola, a partir de um corte no centro da esfera.

3.5.1 Bolas forjadas

As bolas forjadas que serão utilizadas nos testes têm como matéria-prima as barras de aço de alto carbono e baixa liga, que são processadas em três linhas de produção contínua: aquecimento, laminação e tratamento térmico, conforme fluxograma da Figura 3.6.

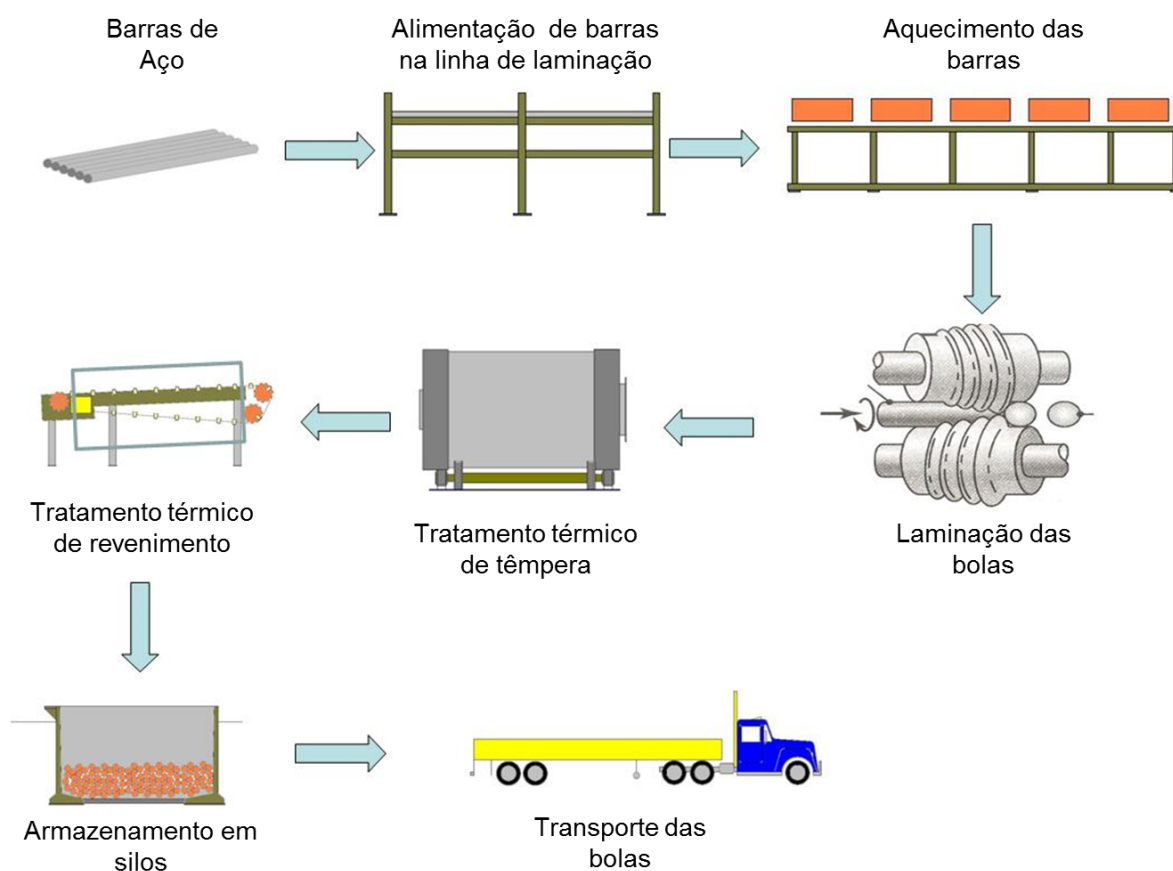


Figura 3.6 - Fluxograma do processo produtivo das bolas forjadas.

O forjamento de um metal consiste em deformá-lo por martelamento ou prensagem. É, possivelmente, a mais antiga operação de conformação mecânica praticada pelos ferreiros com martelos e bigornas (CETLIN e HELMAN, 2005).

O processo de forjamento é classificado quanto à temperatura (forjamento a frio, forjamento a quente e forjamento a morno), geometria das matrizes (matriz aberta e matriz fechada) e os equipamentos de forja (martelo de forja e prensa).

As bolas forjadas são fabricadas por aços comumente empregados em matrizes de forjamento a quente. As principais características desses aços são alta resistência ao revenimento, elevada resistência mecânica a quente, boa tenacidade, grande resistência a abrasão em temperaturas elevadas, boa condutividade térmica, elevada resistência a fadiga e boa resistência a formação de trincas térmicas. Estas características conferem ao material a capacidade de resistir às solicitações mecânicas e térmicas a que estão sujeitas. Essas propriedades são adquiridas pela adição de elementos de liga como cromo, molibdênio, vanádio, tungstênio, níquel e por tratamentos térmicos adequados.

A têmpera tende a tornar o aço excessivamente rígido (pouca elasticidade) e frágil (pouca resistência ao choque) e a criar tensões internas, o que é corrigido pelo revenimento, que consiste em reaquecer a peça temperada a uma temperatura muito inferior à da têmpera (zona crítica – fase austenítica).

O aço ferramenta representa uma considerável fatia do segmento de aços especiais. Um dos pontos mais importantes no processo de forjamento a quente é o custo da ferramenta envolvida, cujo valor representa 10 a 15% do custo de forjamento e, indiretamente, pode ser superior a 70% (BABU et al., 1999).

A matéria-prima para o processo de forjamento pode ser fundida ou laminada (condição preferível por apresentar microestrutura mais homogênea). As peças forjadas em matriz com peso não superior a 2 ou 3kg são normalmente produzidas a partir de barras laminadas, as de maior peso são tarugos ou palanquilhas, quase sempre também laminados e cortados previamente em tamanho adequado (BRAGA, 2005).

A resistência de uma peça forjada é mais alta ao longo do eixo longitudinal e decresce na direção transversal. Na peça fundida, as propriedades são similares em todas as direções. Dessa forma, as peças forjadas apresentam maior resistência mecânica que as peças fundidas ou usinadas.

3.5.2 Bolas fundidas

As bolas fundidas usam como matéria-prima sucatas, que são processadas conforme fluxograma apresentado na Figura 3.7.

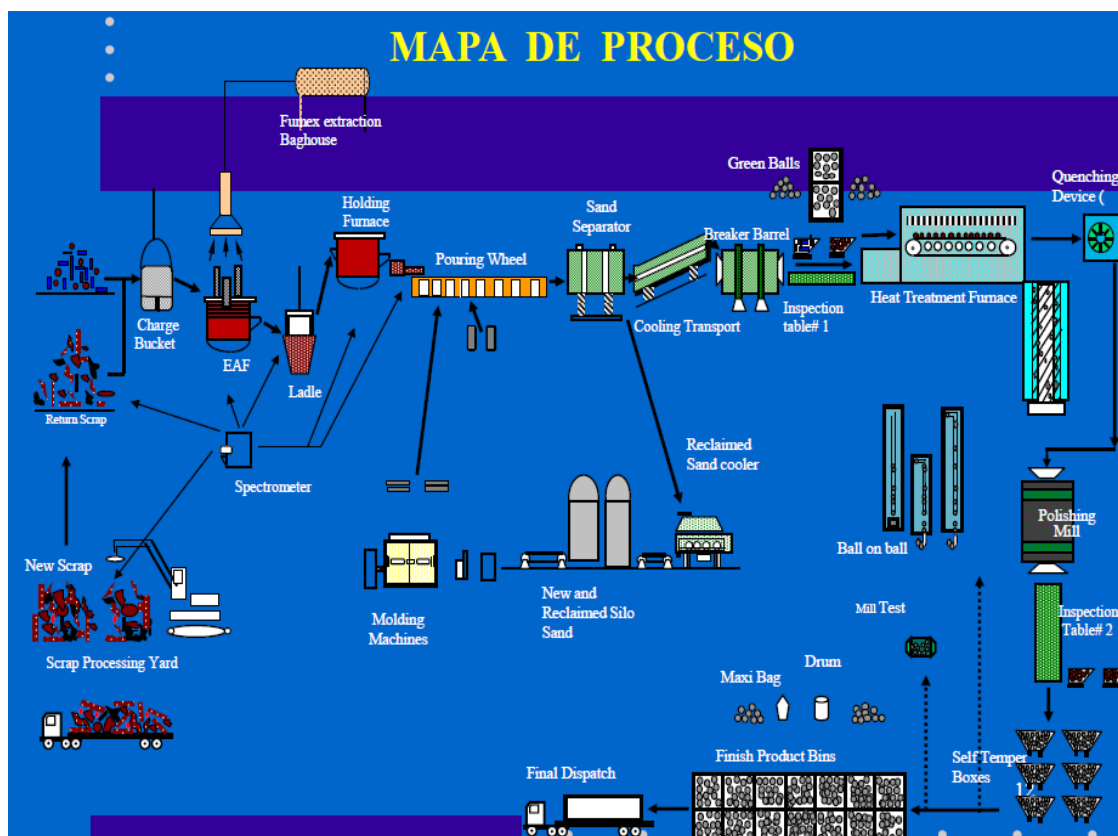


Figura 3.7 – Fluxograma do processo produtivo das bolas fundidas.

Fundição é o processo de fabricação que representa o caminho mais curto entre a matéria-prima metálica e as peças acabadas em condições de utilização.

O processo de fundição consiste, essencialmente, em encher com metal líquido a cavidade de um molde cujas dimensões e formas correspondem às das peças a serem obtidas. Após a solidificação e resfriamento do metal, obtêm-se as peças com formas e dimensões, geralmente, quase definitivas.

Pode-se dizer que no processo de fundição tem-se, entre a matéria-prima sólida e o produto acabado, apenas as etapas de fusão e solidificação, enquanto que nos demais processos de fabricação de peças metálicas - laminação, forjamento, estampagem e trefilação - têm-se, entre a matéria-prima e o produto, além das etapas de fusão e solidificação, uma deformação plástica por tratamento mecânico (SENAI, 1987).

O grande emprego do aço fundido deve-se ao fato de se poder produzir, por fundição, peças de grande variedade de formas e dimensões, com razoáveis resistência e tenacidade a um custo relativamente baixo.

Na realidade, sob o ponto de vista de propriedades mecânicas, admite-se geralmente que o aço fundido seja de qualidade inferior ao trabalhado. Além disso, é frequente as peças fundidas apresentarem alguns defeitos superficiais ou internos, típicos dos processos de fundição.

3.5.3 Bolas forjadas vs. Bolas fundidas

Alguns trabalhos já fizeram comparação no âmbito de desgaste de corpos moedores forjados e fundidos, principalmente utilizando corpos moedores fundidos de alto cromo.

Um destes trabalhos foi realizado por ALBERTIN e MORAES (2007) em moagem de carvão. Os autores utilizaram um moinho piloto de 10L de capacidade com carga e bolas de 132kg, velocidade de 31rpm, onde testaram dois tipos de bolas forjadas e sete tipos de bolas fundidas de alto cromo. Eles submeteram as bolas a uma etapa *run in* de 30 horas de moagem com areia (de 0,3 a 2,5mm) para retirar a camada superficial de 100 μ m de material oxidado ou defeitos superficiais. As amostras de carvão com cerca de 21% de sílica foram submetidas a moagem durante 70 horas, com parada para pesagem das bolas, troca de massa de minério e reposição de 10 em 10 horas. Os autores concluíram que o desgaste de bolas forjadas foi superior ao desgaste das bolas fundidas de alto cromo. Os resultados dos testes são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Resultados dos testes de desgastes realizados por ALBERTIN e MORAES, 2007

BOLA	MATERIAL	% Cromo	TAXA DE DESGASTE ($\mu\text{m/h}$)	FATOR DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE	BOLAS	HORAS DE TESTE
Forjada	Steel A	0,75	0.70	11	10	70
Forjada	Steel B	0,55	0.65	11	18	20
Fundida	C30	31	0.079	94	17	70
Fundida	D15	14	0.55	14	18	20
Fundida	Heat 23	28	0.078	95	10	70
Fundida	Heat 31	29	0.074	100	10	70
Fundida	Heat 25	17,1	0.50	15	9	70
Fundida	Heat 27	19,3	0,30	25	10	70
Fundida	Heat 29	26,6	0,15	49	10	70

CASSOLA *et al.* (2006) também compararam diferentes corpos moedores: fundido de baixo cromo, aço temperado e fundido de alto cromo. Os autores utilizaram um circuito com moinho piloto e classificação para moagem de minério de ferro e bolas marcadas. Os testes mostraram que os corpos moedores de ferro fundido de alto cromo chegaram a ter resistência ao desgaste 150% maior que o corpo moedor de pior desempenho, que foi o de ferro fundido de baixo cromo. Os corpos moedores de aço tiveram resistência até 25% maior que os corpos moedores fundidos de baixo cromo. Os autores verificaram ainda que reagentes inibidores corrosão só tiveram efeitos significativos para os corpos moedores fundidos de baixo cromo.

RIVERA (2012) comparou o aumento do consumo energético do moinho com corpos moedores de diferentes densidades e mostrou a alta correlação entre energia total na moagem e densidade da carga moedora. O autor verificou que as bolas fundidas forneciam cerca de 2% menos energia que as forjadas e as de alto cromo até 5,5% menos energia. As bolas de bronze forneceram mais de 9% a mais de energia que as bolas forjadas.

3.6 Tipos de Desgaste

De acordo com MINTEK (1991), *apud* KRÜGER (2004), os mecanismos de desgastes de corpos moedores no interior de um moinho podem ser descritos por duas teorias. Na primeira delas, a teoria de Davis, o desgaste dos corpos moedores é atribuído principalmente ao impacto e, portanto, à energia cinética da carga que é função de sua massa ou volume; na outra teoria, a de Prentice, a abrasão é considerada o fator determinante, sendo esta proporcional à superfície da carga, uma vez que somente a mesma está exposta à abrasão. Analisando apenas essas duas teorias, a distribuição da carga deveria exibir características definidas com uma distribuição hiperbólica para a teoria volumétrica e com o mesmo número de bolas em cada intervalo de tamanho para quando a superfície é o fator determinante. Em casos reais existe sempre uma combinação das duas teorias, sendo que, de um modo geral, pode ser atribuído ao mecanismo abrasivo cerca de 75% do desgaste, embora as condições operacionais possam mudar substancialmente esse valor.

Apesar da contribuição significativa do componente abrasivo do desgaste, não se deve esquecer que toda polpa mineral possui íons em solução, que podem adicionar um componente de desgaste corrosivo, tendo ação sinérgica com o desgaste abrasivo (ROVERI e CHAVES, 2011).

Em suma, têm-se os seguintes desgastes de corpos moedores no interior de um moinho: desgaste por abrasão, desgaste por impacto e desgaste por corrosão, que serão descritos detalhadamente a seguir.

3.6.1 Desgaste por abrasão

GATES (1998) define o desgaste por abrasão como aquele desgaste em que partículas duras ou ásperas de um corpo, se movendo sobre outro corpo menos duro, penetram e removem material da superfície do corpo de menor dureza, deixando estrias.

De acordo com CORRÊA (2005) o desgaste abrasivo pode ser 2-corpos e 3-corpos. O desgaste de 2-corpos ocorre quando um abrasivo desliza ao longo de uma superfície com pouca trituração (redução de tamanho), por exemplo, em máquinas de manuseio de minério. O desgaste de 3-corpos ocorre quando um abrasivo é aprisionado entre uma superfície e a outra. Este resulta em altas tensões quando as partículas são reduzidas de tamanho, seja deliberadamente, como em equipamentos de trituração de minério ou de forma imprevista, quando do ingresso de partículas estranhas para dentro dos mancais.

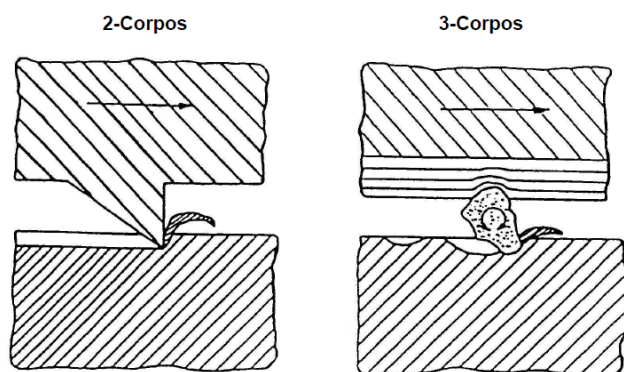


Figura 3.8 - Representação esquemática do desgaste de 2 e 3-corpos.

Fonte: adaptado de ZUM GAHR (1987)

A taxa de abrasão vai depender de certas características do abrasivo: dureza, tamanho, formato, degradação, velocidade de contato e carga.

A dureza da partícula abrasiva é importante para a taxa de abrasão do metal, ou seja, o desgaste do sistema depende da relação entre a dureza do metal (H_m) e a dureza do abrasivo (H_a) denominada “coeficiente de dureza”. A resistência ao desgaste abrasivo aumenta à medida que a dureza do material desgastado se aproxima daquela do abrasivo.

Segundo STROMBERG (1982), o desgaste a baixas tensões é proporcional à dureza da superfície sujeita à sollicitação, embora também dependa do tamanho e concentração de fases duras como carbonetos, fosfetos e outras. A Tabela 3.3 indica os valores de dureza de abrasivos mais comuns e dos

diferentes microconstituintes em aços e ferros fundidos. De acordo com a teoria supracitada na tabela abaixo, a hematita (mineral de ferro) é capaz de cortar a perlita, mas, não a martensita. Por sua vez, a martensita pode ser cortada pelo quartzo. A tabela mostra, também, a vantagem dos ferros fundidos brancos alto cromo, os quais apresentam uma dureza maior do que a maioria dos minerais.

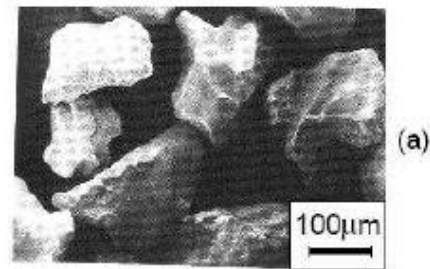
Tabela 3.3 - Dureza de abrasivos, fases ferrosas e carbonetos

Abrasivos	Dureza (HV)	Microconstituintes	Dureza (HV)
Diamante	10.000	Carboneto de titânio (TiC)	3200
SiC	2400	Carboneto de vanádio (VC)	2800
Alumina (Al ₂ O ₃)	2000	Carboneto de Nióbio (NbC)	2300
Granada	1350	Carboneto de tungstenio (WC)	2250
Quartzo (SiO₂)	900-1280	Carboneto de molibdênio (Mo ₂ C)	1600
Sinter	770	Carboneto de cromo (Fe,Cr)₇C₃	1200-1600
Feldspato	600-750	Cementita	840-1100
Apatita	540	Martensita	500-1010
Vidro	500	Austenita, baixa liga	250-350
Minério de Fe	470	Austenita, 12% Mn	170-230
Coque	200	Perlita ligada	300-460
Calcita	140	Perlita não ligada	250-320
Cal (Cão)	110	Ferrita	70-200
Carvão	32		

Fonte: CORREA (2005)

Quanto ao tamanho do abrasivo, são vários os estudiosos que afirmam que quanto maior o abrasivo maior a taxa de desgaste.

O formato do abrasivo é importante, pois influencia o formato do sulco produzido no material. Segundo CORRÊA (2005), vários estudos têm mostrado que partículas abrasivas angulares com muitas arestas cortantes, Figura 3.9, causam desgastes mais acentuados que as arredondadas.



Partículas "abrasivas" SiO_2

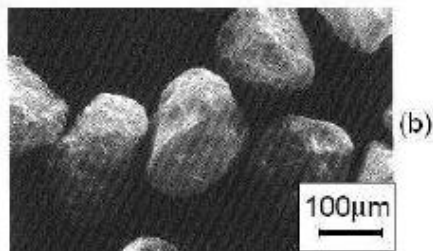


Figura 3.9 - Abrasivos de sílica (a) angulares (b) arredondados.

Fonte: CORREA (2005), *apud* ROBERTS (2013)

O efeito de degradação do abrasivo influencia na abrasão, uma vez que durante a abrasão é comum o abrasivo se degradar, perder massa. A Figura 3.10 mostra a massa removida em função do número de giros de um aço sobre uma lixa abrasiva 220 mesh de SiC. A lixa rapidamente perde eficiência e, após 1600 giros, não é mais efetiva no desgaste (MULHEARN e SAMUELS, 1962).

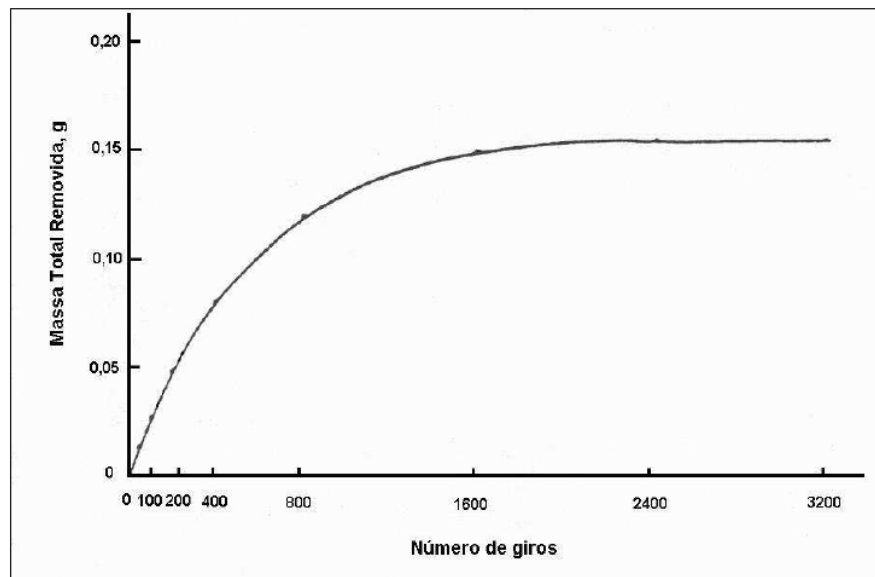


Figura 3.10 - Taxa de remoção de material em função do curso de um aço sobre uma lixa abrasiva SiC 220 mesh.

Fonte: MULHEARN E SAMUELS (1962)

Segundo CORRÊA (2005) a taxa de desgaste abrasivo aumenta levemente com o aumento da velocidade na faixa de 0 a 2,5m/s, sendo este aumento no desgaste atribuído ao aquecimento da superfície provocado pelo atrito das partículas abrasivas, o que provoca um aumento da plasticidade na área atritada da superfície.

CHAVES e PERES (2003) afirmam que existem diferentes mecanismos de desgaste por abrasão, mas, para efeito de exposição do assunto, eles podem ser reduzidos a três: sulcamento, erosão e riscamento.

As bolas de moinho estão submetidas principalmente ao sulcamento que é característico de partículas mais grosseiras, impactando superfícies de baixa dureza com velocidades altas e médias. Pedacos macroscópicos da liga metálica são arrancados das superfícies pela ação de corte das partículas do mineral.

Dessa forma a composição química da liga e o tratamento térmico recebido influenciam na sua resistência ao desgaste abrasivo por sulcamento.

3.6.2 Desgaste por impacto

É um desgaste provocado por choques ou cargas aplicadas verticalmente sobre superfícies metálicas. Essas cargas podem ser resultantes de martelamento, pancadas, apiloamentos ou outros quaisquer meios de concentração de esforços. Essas cargas, aplicadas em velocidade e em áreas localizadas, podem provocar o desgaste de um metal por trituração, pulverização, quebra, fragmentação, lascamento ou escamação.

Ao contrário dos outros tipos de desgaste, cuja ação depende das propriedades superficiais dos metais, o impacto tem sua atuação diretamente relacionada com as propriedades dos metais abaixo das suas superfícies.

3.6.3 Desgaste por corrosão

Conforme ROVERI e CHAVES (2011), o processo de desgaste não é apenas mecânico, como a maioria das aproximações matemáticas faz crer, mas é também eletroquímico, uma vez que na polpa de moagem existem espécies iônicas capazes de acarretar a corrosão do metal.

A corrosão metálica é a transformação de uma liga metálica pela sua interação química ou eletroquímica num meio agressivo. Trata-se de um processo eletroquímico em que o ferro metálico (Fe^0) cede elétrons e recebe íons do oxigênio da polpa, tornando-o oxidado (Fe^{3+}).

Durante a moagem a úmido, uma superfície recém-desgastada por abrasão reage com a água para formar um recobrimento de óxido ou hidróxido. As bolas de ferro fundido ou forjadas se comportam como ânodo e sofrem uma reação de dissolução (corrosão), enquanto que a reação suporte é a redução do oxigênio (CHENJE *et al.*, 2003).

O processo corrosivo é acelerado pela abrasão: o produto da corrosão é um material oxidado, facilmente removível pela ação mecânica da rolagem entre as bolas, intensificada pela presença de minerais abrasivos. A sua remoção expõe uma superfície fresca do metal, quimicamente ativa e pronta para ser corroída rapidamente. Deste modo, a ação torna-se extremamente rápida e danosa.

CHENJE *et al.* (2003) realizaram testes de moagem de bancada com bolas marcadas fazendo moagem a úmido, a seco e rodando o moinho somente com as bolas, ou seja, sem abrasivos. Os corpos moedores de 60mm de diferentes ligas apresentaram um desgaste maior na moagem a úmido, reforçando o efeito sinérgico da corrosão com a abrasão na moagem, representando cerca de 15 % a mais de desgaste. Para corpos moedores de médio cromo, forma-se uma camada dura de óxido, o que reduziu a corrosão.

Os testes de moinho funcionando sem abrasivo foram usados para comprovar que o principal mecanismo de desgaste é o de abrasão com o minério e não entre bolas, segundo os resultados apresentados na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Taxas de desgaste nos testes de moagem realizados por CHENJE *et al.* (2003)

TIPO DE BOLA	Taxas de desgaste g/h		
	Moagem a úmido	Moagem a seco	Moagem sem abrasivo
Aço de baixa liga	0,48	0,41	0,20
Aço eutetoide	0,51	0,46	0,28
Ferro fundido de médio cromo	0,26	0,25	0,13
Ferro fundido semi-aço	0,45	0,38	0,21
Ferro fundido puro	0,46	0,38	0,22

Uma forma de diminuir a corrosão é pela adição de algum álcali à polpa, como a soda cáustica, resultando em aumento do pH. ROVERI e CHAVES (2011) realizaram testes de bolas marcadas em moinho de bancada para verificar a taxa de desgaste em dois níveis de pH (8,5 e 10,5). Foram utilizados dois tipos de corpos moedores, aço e ferro fundido branco de alto cromo, e dois tipos de

minérios, um que eles chamaram de alta sílica (AS) com 6% de SiO₂ e outro que chamaram de baixa sílica (BS) com 1,8% de SiO₂. Os autores verificaram que a taxa de desgaste dos corpos moedores de aço reduziu em 11,5% e os de ferro fundido em 6,7% com o aumento do pH na moagem da amostra BS. Nas moagens da amostra AS a redução do desgaste com o aumento do pH foi menor, cerca de 4,16% para os corpos moedores de aço e 5,76% para os de ferro fundido.

ZHOU *et al.* (2007) avaliaram a erosão-corrosão de ferro fundido martensítico com ligas diferentes sobre polpa de quartzo em diferentes valores de pH, e concluíram que a resistência ao desgaste erosivo-corrosivo aumenta com a adição de níquel e cobre às ligas em pH ácido e com adição de cromo, níquel e cobre em pH neutro a alcalino.

3.7 Tratamentos Térmicos e Desgaste

Define-se como tratamento térmico o aquecimento ou resfriamento controlado dos metais feito com a finalidade de alterar suas propriedades físicas e mecânicas, sem alterar a forma do produto final.

ORTEGA *et al.* (2004) avaliaram o desgaste de rolos de moinho de rolo sobre pista, tendo esses rolos passado por diferentes tratamentos térmicos. Eles avaliaram o efeito da desestabilização em diferentes temperaturas e tempos, sobre rolos que passaram e não passaram por recozimento. Inicialmente eles observaram que esses rolos, de ferro fundido branco de alto cromo, quando submetidos a tratamento de recozimento antes da desestabilização atingem durezas maiores, para todas as temperaturas analisadas (900, 950, 1000, 1050 e 1100°C), num menor tempo, meia hora. Por consequência as menores taxas de desgaste também foram para as ligas previamente recozidas. Os autores observaram que num mesmo tempo de desestabilização a microdureza está altamente relacionada com a precipitação de carbonetos na matriz metálica, que por si só aumenta a quantidade de martensita e a dureza da matriz.

CHENJE *et al.* (2003) avaliaram o desgaste de corpos moedores forjados e fundidos diferentes e submetidos a tratamentos térmicos diferentes, o que resulta em microestruturas diferentes. Os corpos moedores fundidos com alto teor de carbono apresentaram maior dureza quando comparados com as ligas eutetoide e aços de baixa liga. Os corpos moedores de liga com microestrutura marcada por perlita e nenhum carboneto apresentaram baixa dureza e alta taxa de desgaste.

4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste estudo foi dividida em duas partes. A primeira envolve testes de eficiência de moagem utilizando os dois tipos de bolas, forjadas e fundidas, com amostra da alimentação do Concentrador I, sendo dividida em três etapas:

- I. Amostragem e preparação da amostra;
- II. Caracterização da amostra;
- III. Execução dos ensaios tecnológicos.

A segunda parte envolve a realização de testes de desgaste dos corpos moedores, sendo, também, dividida em duas etapas:

- I. Caracterização das bolas;
- II. Execução dos ensaios tecnológicos.

4.1 Testes de Eficiência de Moagem

Os testes de eficiência de moagem em bancada foram realizados para avaliar o consumo energético entre dois tipos de bolas utilizadas na moagem da amostra da alimentação do Concentrador I da Samarco.

4.1.1 Amostragem e preparação da amostra

A amostra da alimentação da usina foi formada por um incremento tomado diariamente durante 30 dias. No final dos 30 dias, os incrementos formaram uma amostra com aproximadamente 300kg.

A amostra foi homogeneizada em pilha cônica, sendo retirada uma alíquota de 2kg. Este material foi submetido a uma peneira com malha de 3/8", onde o retido foi britado até toda amostra ficar abaixo de 3/8".

O produto foi homogeneizado e realizado o quarteamento para cada teste de eficiência de modo que foram obtidas quatro alíquotas:

- 5664 g para moagem durante 5 minutos
- 5664 g para moagem durante 10 minutos
- 5664 g para moagem durante 15 minutos
- 5664 g para moagem durante 20 minutos

Como foram feitos 3 testes com bolas fundidas e 3 com bolas forjadas, foram retiradas um total de 24 alíquotas de 5664g para as moagens, além de duas alíquotas para análise granulométrica e análise química.

4.1.2 Caracterização da amostra

Foram utilizados os seguintes métodos para a caracterização da amostra:

- I. Análise química quantitativa (ICP-OES, dicromatometria e gravimetria);
- II. Análise granulométrica;
- III. Análise do grau de liberação.

Os procedimentos gerais para cada um desses métodos serão descritos neste tópico e o fluxograma elaborado para a caracterização da amostra é mostrado Figura 4.1.

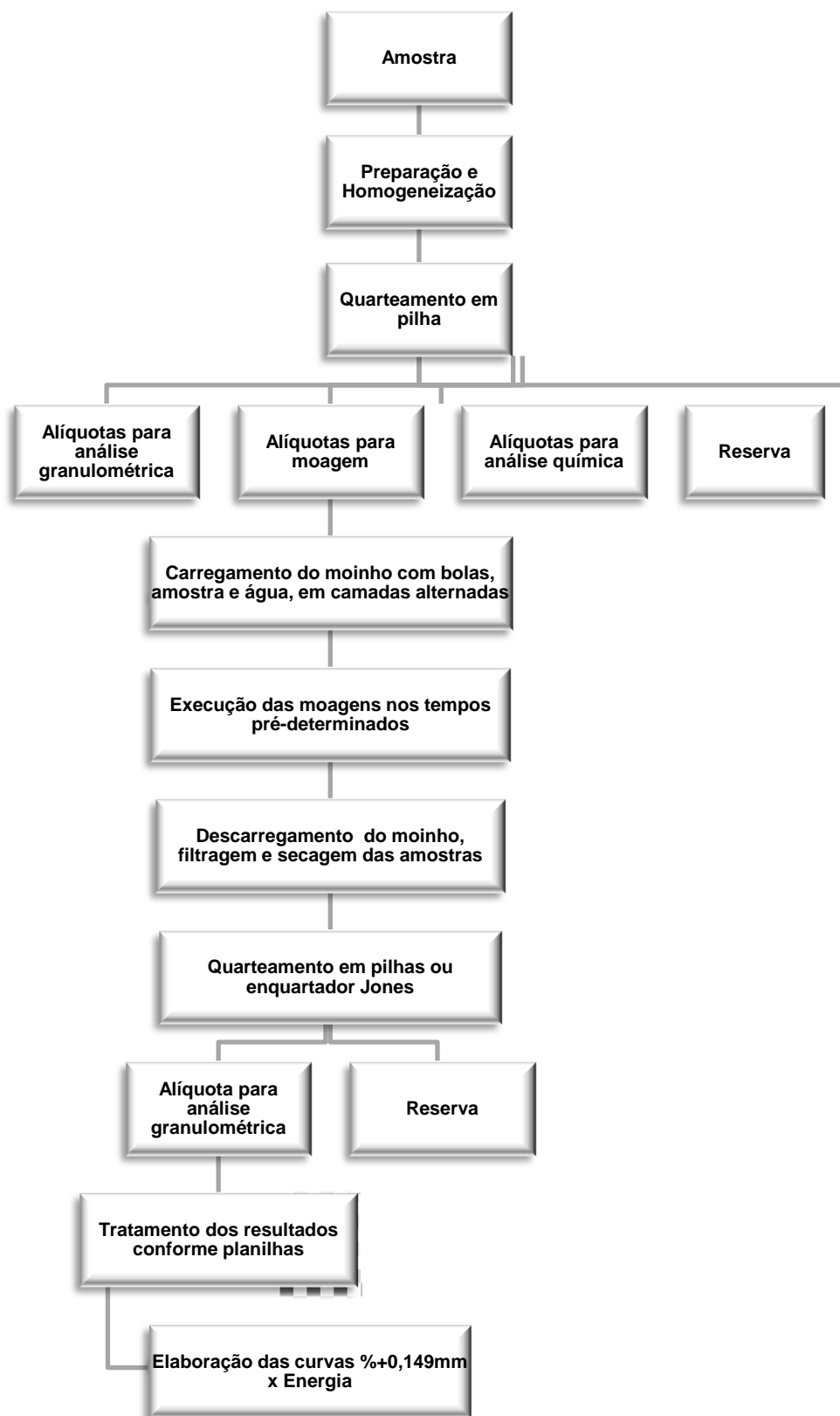


Figura 4.1 – Fluxograma de execução dos ensaios e processamento dos dados.

4.1.2.1 Análise química quantitativa

As análises químicas foram realizadas no Laboratório Químico da Samarco, conforme procedimentos internos. Nesse procedimento, os teores de Al_2O_3 , P e MnO foram determinados por um espectrômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP- ES), da marca Varian, modelo 725-ES. Os teores de ferro foram determinados por dicromatometria (método TiCl_3) e os teores de PPC foram determinados por gravimetria (calcinação em forno mufla a 1000°C). Os teores de SiO_2 foram determinados por diferença.

4.1.2.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica da amostra foi realizada no Laboratório de Controle de Processo da Samarco, conforme procedimento interno. Nesse procedimento, foram utilizados o peneirador Ro-Tap e peneiras da série Tyler, com as seguintes aberturas: $12.700\mu\text{m}$, $9.525\mu\text{m}$, $7.938\mu\text{m}$, $6.350\mu\text{m}$, $4.750\mu\text{m}$, $3.360\mu\text{m}$, $2.380\mu\text{m}$, $1.680\mu\text{m}$, $1.190\mu\text{m}$, $1.000\mu\text{m}$, $840\mu\text{m}$, $595\mu\text{m}$, $420\mu\text{m}$, $297\mu\text{m}$, $210\mu\text{m}$, $149\mu\text{m}$, $105\mu\text{m}$, $74\mu\text{m}$, $53\mu\text{m}$, $44\mu\text{m}$ e $37\mu\text{m}$. As peneiras usadas são da marca Bronzinox, com 20cm de diâmetro e 7cm de altura.

4.1.3 Ensaios tecnológicos

Os ensaios de moagem foram realizados pela metodologia desenvolvida por DONDA (2003), que consiste em efetuar moagens em diferentes tempos (0, 5, 10, 15 e 20 minutos), em condições padronizadas, convertendo-se tempo em consumo específico de energia, através do cálculo da potência dos moinhos de laboratório utilizando-se a equação de Rowland para moinhos de pequenos diâmetros.

Foram feitas análises granulométricas da alimentação e dos produtos dos ensaios e plotado gráfico, como exemplo na Figura 4.2. A partir do valor

desejado para o percentual retido em 0,149mm determina-se a energia necessária para atingir este valor.

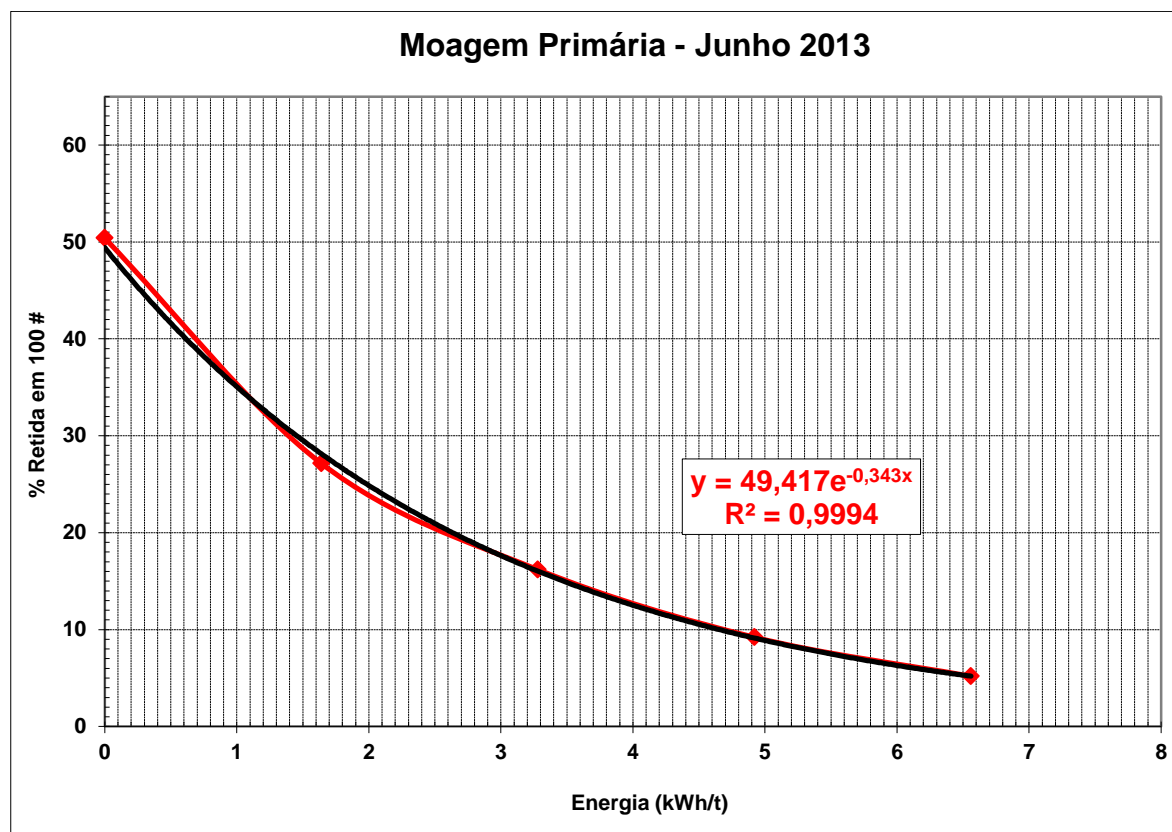


Figura 4.2 – Exemplo de dados de ensaios de moagem plotados.

As condições geralmente utilizadas para os ensaios referentes a moagem primária são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Condições de execução do método para a moagem primária

Condições para moagem primária	
Parâmetro	Condição
Diâmetro interno do moinho (m)	0,3048 (12 pol)
Comprimento interno (m)	0,3048 (12 pol)
% de enchimento	29,6
Relação V_{polpa}/V_{vazios}	1,07
% de sólidos em volume	49,75
% de sólidos em peso*	79

% velocidade crítica	70			
Peso de minério (kg) para *peso específico = 3,8	5,0			
Peso da carga (kg)	30,578			
Tipo de corpo moedor	Bolas			
Distribuição da carga	Diâmetro	%	Peso (kg)	
	63,5	35	10,702	
	50,8	41	12,537	
	38,1	18	5,504	
	25,4	6	1,835	
Área específica da carga	15,5m ² /t			
Volume interno do moinho (litros)	22,24			
Volume aparente da carga (litros)	6,576			
Volume de vazios da carga (litros)	2,630			
Volume da polpa (litros)	2,645			
Volume real de minério (litros)	0,696			
Volume de água (litros)	1,329			
Potência (kW) no eixo pinhão	0,1114			
Fator de conversão do tempo de moagem (minutos) em energia (kWh/t)	0,3713			
Energia no eixo pinhão (kWh/t)	2	4	8	12
Tempos de moagem (minutos)	5,4	10,8	21,5	32,3
Revestimento/ "lifters"	Sem revestimento e sem <i>lifters</i>			
Limite para cálculo do K	Malha com no mínimo 5 % retido			
Amostra para execução dos ensaios	Alimentação do circuito britada e peneirada, 100% passante em 9,53 mm			

Foram efetuados três testes de eficiência energética que conceberam diferentes distribuições de carga moedora:

- a) Teste I: Efetuado equalizando as massas de corpos moedores, não levando em consideração a quantidade de bolas e o diâmetro;

- b) Teste II: Efetuado eliminando o diâmetro de 60mm das bolas forjadas, afim de se conseguir uma maior quantidade de carga moedora;
- c) Teste III: Efetuado equalizando o diâmetro e a massa dos corpos moedores.

4.2 Testes de Desgaste

4.2.1 Caracterização das bolas

Foram utilizados os seguintes métodos para a caracterização das bolas:

- I. Análise química quantitativa;
- II. Análise de dureza.

Os procedimentos gerais para cada um desses métodos serão descritos neste tópico e o fluxograma elaborado para a caracterização das bolas é mostrado na Figura 4.3.

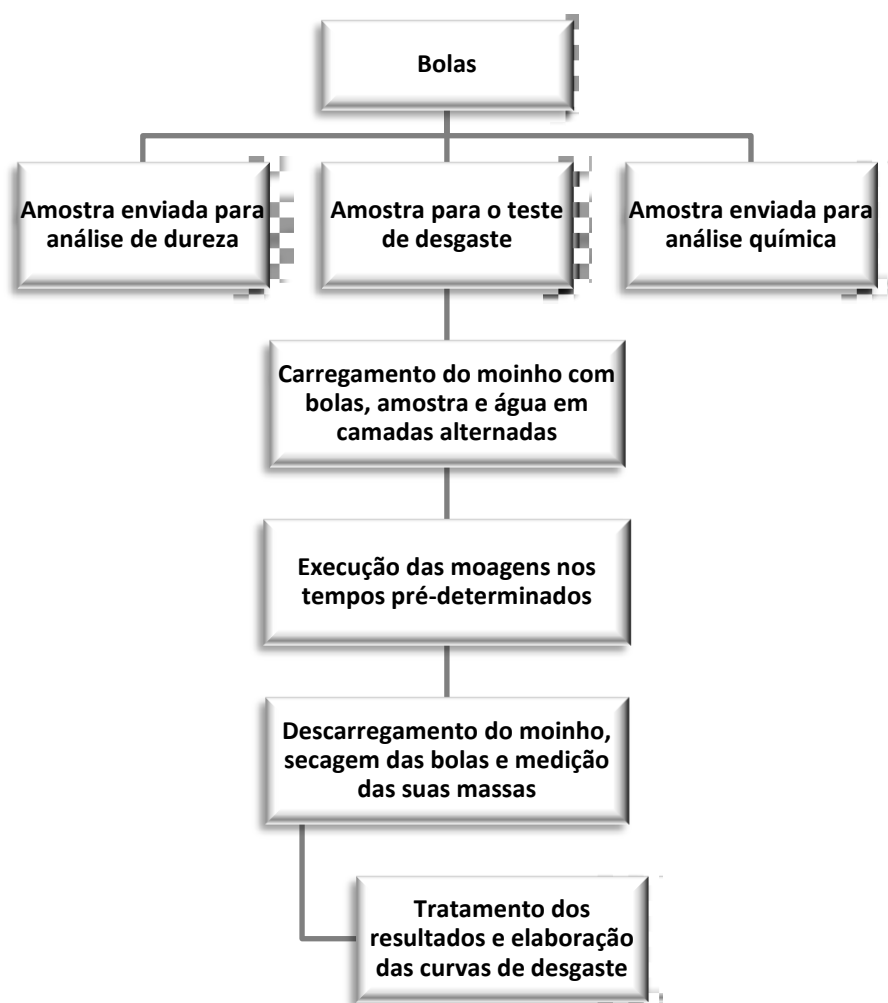


Figura 4.3 - Fluxograma de execução dos ensaios e processamento dos dados.

4.2.1.1 Análise química

A análise química das bolas foi executada em um laboratório externo à Samarco e o método utilizado foi a espectrometria de fluorescência de raios-x. Um dos principais atrativos desse método é a relativa simplicidade de preparação das amostras já pulverizadas. A fusão das amostras com fundentes e o posterior resfriamento produz vidros. Esta forma de homogeneização da amostra facilita a determinação de elementos maiores e menores.

4.2.1.2 Análise de Dureza

A análise de dureza foi realizada no Laboratório de Controle e Processo da Samarco Mineração, onde a amostra passou pelo lixamento e polimento anteriormente à medição realizada pelo durômetro.

As bolas foram preparadas para a análise de dureza através do lixamento nas lixas de 50, 180, 240 e 400. As análises de dureza (HRc) dos corpos moedores foram realizadas em um durômetro Durotwin DT-10 da Mitutoyo.

4.2.2 Ensaios Tecnológicos

Os ensaios de desgaste foram realizados em um moinho 30,48cm x 30,48cm (12" x 12"), com a mesma amostra utilizada no teste de eficiência energética, onde foram efetuadas 20 moagens para cada tipo bola (forjada e fundida), sendo cada moagem em 60 minutos. As bolas eram lavadas e secadas após cada moagem, em seguida eram pesadas em uma balança de precisão Mettler Toledo PB8001-S/Fact. As mesmas bolas eram retornadas para o moinho juntamente com nova alíquota para moagem.

Conhecendo a teoria volumétrica do desgaste de bolas que afirma que a razão de desgaste de uma bola é proporcional à sua massa, portanto ao seu volume, ou seja, ao cubo de seu diâmetro, determinou-se o diâmetro equivalente a partir dos valores de massa e densidade dos corpos moedores.

As condições para os ensaios de desgaste são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Parâmetros para a realização do teste de desgaste

Parâmetros					
Moinho	pH	Vol. H ₂ O (mL)	Massa Minério (g)	Tempo (min)	Rotação RPM
12" x 12"	9,5	1.200	3.500	60	62

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Testes de Eficiência de Moagem

5.1.1 Caracterização da amostra

5.1.1.1 Análise química quantitativa

O resultado da análise química da amostra utilizada nos testes de eficiência de moagem está apresentado na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Análise química da amostra utilizada nos ensaios

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PPC	MnO ₂	Densidade
45,49	32,05	0,61	0,038	2,14	0,07	3,829

Os valores apresentados na tabela acima mostram que a amostra foi representativa em relação aos dados praticados industrialmente.

5.1.1.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica referente à amostra para os testes de eficiência de moagem apresentou a distribuição conforme a tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Análise granulométrica da amostra de alimentação dos testes de moagem

Peneiramento		Alimentação da moagem			
Malha (Tyler)	Abertura (µm)	Massa (g)	Ret. Simples (%)	Ret. Acum. (%)	Passante (%)
5/8	15.875	0	0	0	100
1/2	12.700	0	0	0	100
3/8	9.525	0	0	0	100
5/16	7.938	49,50	2,99	2,99	97,01
1/4	6.350	113,70	6,88	9,87	90,13
4	4.750	117,70	7,12	16,99	83,01
6	3.360	119,40	7,22	24,20	75,80

8	2.380	88,80	5,37	29,57	70,43
10	1.680	78,30	4,73	34,31	65,69
14	1.190	49,60	3,00	37,31	62,69
16	1.000	19,50	1,18	38,49	61,51
20	840	2,50	1,74	40,23	59,77
28	595	2,53	1,77	42,00	58,00
35	420	2,95	2,05	44,05	55,95
48	297	2,64	1,84	45,89	54,11
65	210	5,18	3,61	49,51	50,49
100	149	8,75	6,10	55,61	44,39
150	105	9,84	6,86	62,47	37,53
200	74	10,82	7,55	70,01	29,99
270	53	9,93	6,93	76,94	23,06
325	44	3,55	2,48	79,42	20,58
-325	44	29,51	20,58	100,00	---

O percentual retido em 100# está coerente com os valores registrados industrialmente.

5.1.2 Ensaios tecnológicos

No Teste I de eficiência de moagem buscou-se a equalização das massas de corpos moedores, não levando em consideração a quantidade de bolas e o diâmetro. Outra diferença foi o uso de bolas com diâmetro de 32 mm apenas na carga de bolas fundidas. Por esse fato, a razão superficial das bolas forjadas foi menor em aproximadamente 3 m²/m³, beneficiando as bolas fundidas. As Tabelas 5.3 e 5.4 demonstram esta diferença.

Tabela 5.3 - Distribuição da carga de bolas fundidas no Teste I

Bolas Fundidas						
D (mm)	Massa (g)	Nº Bolas	Esc. %	m ²	m ³	m ² /m ³
60	12693,6	13	43%	0,037	0,028	1,30
50	9823,4	19	33%	0,037	0,016	2,28
40	3421,3	12	11%	0,015	0,008	1,80
32	2187,3	19	7%	0,015	0,004	3,56

25	1717,7	23	6%	0,011	0,002	5,52
207	29843,3	86	100%	0,12	0,06	14,46

Tabela 5.4 - Distribuição da carga de bolas forjadas no Teste I

Bolas forjadas						
D (mm)	Massa (g)	N° Bolas	Esc. %	m ²	m ³	m ² /m ³
63	12887,8	11	44%	0,034	0,033	1,05
50,8	11237,1	19	38%	0,039	0,017	2,24
38	3489,2	14	12%	0,016	0,007	2,21
25,4	1837,5	24	6%	0,012	0,002	5,67
177,2	29451,6	68	100%	0,101	0,059	11,17

Apesar das massas serem diferentes, essa diferença é muito pequena (1,30%) se comparada com a diferença entre a quantidade de bolas, tendo as bolas fundidas 26,47% a mais do que as bolas forjadas. Esse fato pode ser explicado devido à composição do colar das bolas fundidas que nos diâmetros de 40mm, 32mm e 25mm foram compostas por bolas de alto cromo, deixando a carga com uma densidade menor e conseqüentemente uma massa menor.

A Figura 5.1 demonstra os resultados do teste:

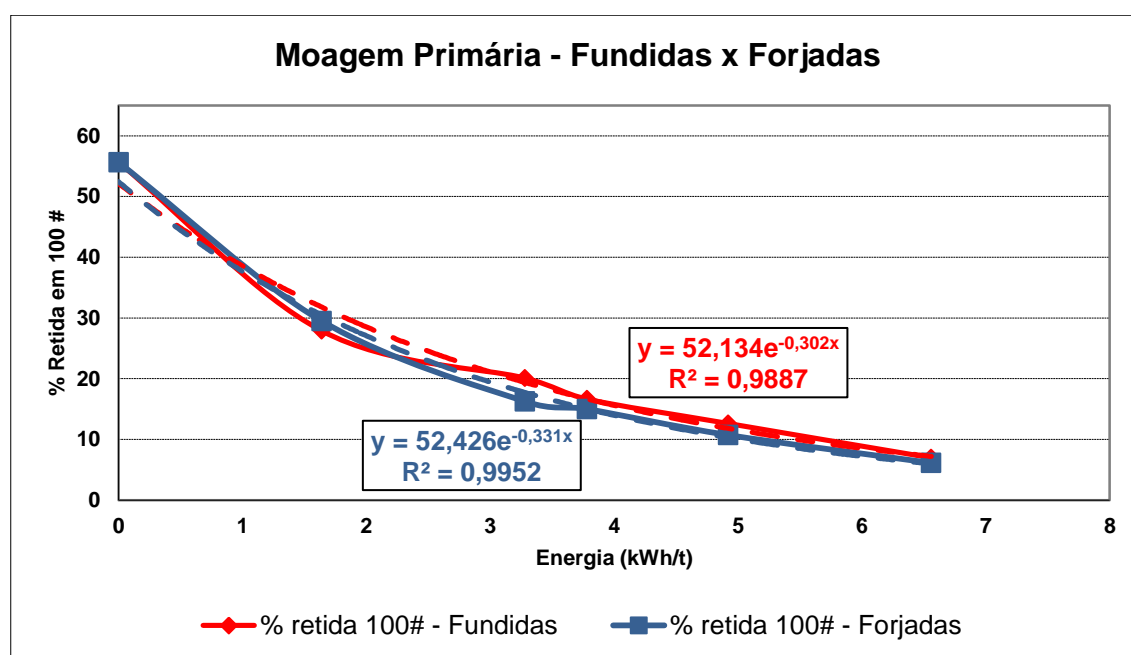


Figura 5.1 - Eficiência energética de moagem no Teste I.

Nota-se que as bolas forjadas foram 10% superiores às bolas fundidas, fazendo-se análise em função da constante K (t/kWh), ou seja, a taxa de decaimento volumétrica. Isso significa que no moinho com bolas forjadas pode-se alimentar uma massa 10% superior àquela alimentada no moinho de bolas fundidas para uma mesma granulometria do produto desejada. Entretanto, as bolas de alto cromo que compõem a carga das bolas fundidas podem influenciar negativamente os resultados dessas. O anexo I apresenta os resultados do teste.

No Teste II de eficiência de Moagem, eliminou-se o diâmetro de 60mm das bolas forjadas, afim de se conseguir uma maior quantidade de carga moedora e conseqüentemente aumentar a razão superficial dessas bolas. Este teste se deu em função das bolas forjadas terem maior densidade e por isso eliminou-se o seu maior diâmetro. As Tabelas 5.5 e 5.6 apresentam estas diferenças.

Tabela 5.5 - Distribuição da carga de bolas fundidas no Teste II

Bolas Fundidas						
D (mm)	Massa (g)	Nº Bolas	Esc. %	m ²	m ³	m ² /m ³
60	12693,6	13	43%	0,037	0,028	1,30
50	9823,4	19	33%	0,037	0,016	2,28
40	3421,3	12	11%	0,015	0,008	1,80
32	2187,3	19	7%	0,015	0,004	3,56
25	1717,7	23	6%	0,011	0,002	5,52
207	29843,3	86	100%	0,12	0,06	14,46

Tabela 5.6 - Distribuição da carga de bolas forjadas no Teste II

Bolas forjadas						
D (mm)	Massa (g)	Nº Bolas	Esc. %	m ²	m ³	m ² /m ³
50,8	22541,7	38	81%	0,077	0,017	4,49
38	3489,2	14	12%	0,016	0,007	2,21
25,4	1837,5	24	7%	0,012	0,002	5,67
114,2	27868,4	76	100%	0,11	0,03	12,37

A razão superficial da carga das bolas forjadas aumentou em 10,74% em relação ao primeiro teste, bem como a quantidade de bolas que foi 11,76% superior. Entretanto, a massa de corpos moedores foi 5,38% inferior.

A Figura 5.2 apresenta os resultados do Teste II.

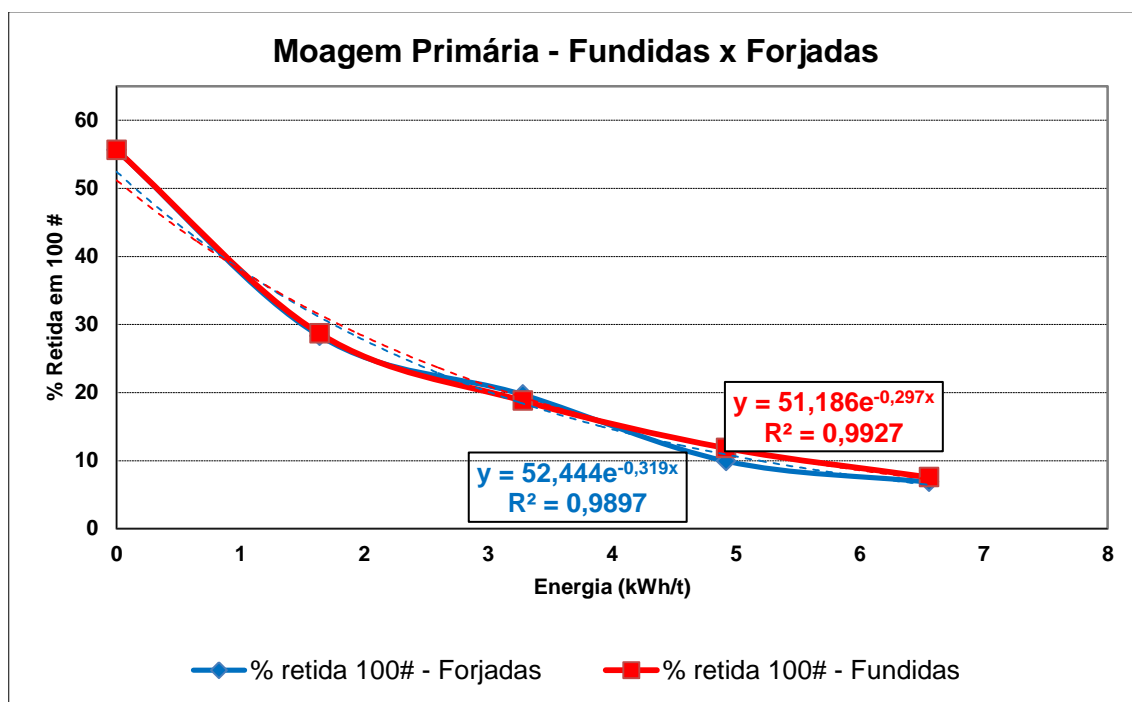


Figura 5.2 - Eficiência energética de moagem no Teste II

As bolas forjadas apresentaram uma eficiência de 7,40% maior que as bolas fundidas. Apesar da eliminação das bolas de 63mm no teste das bolas forjadas, ainda assim a razão superficial foi menor que a das bolas fundidas.

Uma observação a ser realizada é o fato das bolas fundidas terem ficado com uma massa 7% superior às bolas forjadas. O anexo II apresenta os resultados do teste.

No Teste III equalizou-se o diâmetro e a massa dos corpos moedores. O escalonamento da carga utilizada neste teste foi o proposto por Bond, onde para o diâmetro máximo de 65mm, utiliza-se a seguinte distribuição: 34% para bolas de 65mm, 43% para bolas de 50mm, 17% para bolas de 40mm e 6%

para bolas de 25mm. A tabela 5.7 abaixo demonstra as cargas dos dois ensaios.

Tabela 5.7 - Distribuição da carga de bolas fundidas no Teste III

Bolas Fundidas						
D (mm)	Massa (g)	Nº Bolas	Esc. %	m ²	m ³	m ² /m ³
60	10033	10	33,5%	0,028	0,028	1,00
50	12913,7	29	43%	0,057	0,016	3,48
40	5285,8	19	17,5%	0,024	0,008	2,85
25	1822,8	28	6%	0,014	0,002	6,72
175	30055,3	86	100%	0,12	0,06	14,05

Tabela 5.8 - Distribuição da carga de bolas forjadas no Teste III

Bolas forjadas						
D (mm)	Massa (g)	Nº Bolas	Esc. %	m ²	m ³	m ² /m ³
63	10630,8	9	35%	0,028	0,033	0,86
50,8	13092,2	22	43%	0,045	0,017	2,60
40	4719,6	19	16%	0,024	0,008	2,85
25,4	1782,5	23	6%	0,012	0,002	5,43
179,2	30225,1	73	100%	0,11	0,06	11,74

Apesar das massas de corpos moedores estarem bem próximas (0,5% de diferença), a quantidade de bolas e a razão superficial ainda continuaram distintas, sendo que as bolas fundidas ficaram superiores em 17,8% e 19,67% respectivamente.

Os resultados do Teste III são apresentados na Figura 5.3.

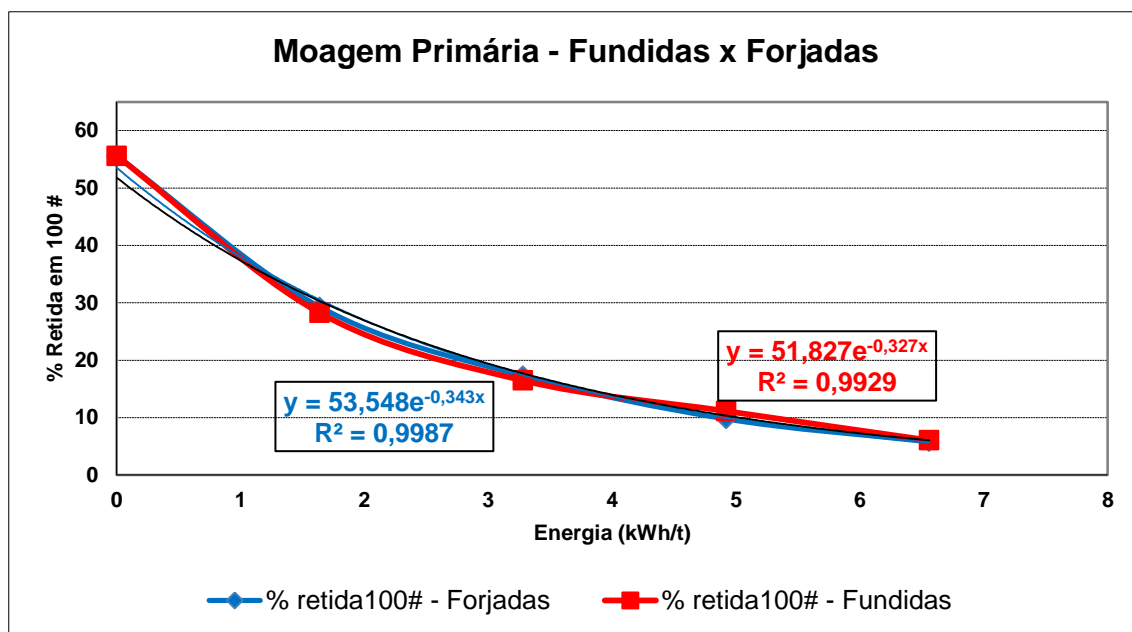


Figura 5.3 - Eficiência energética de moagem no Teste III

As bolas forjadas foram 4,9% superiores às bolas fundidas, mesmo com as massas equalizadas a razão superficial para as bolas forjadas foi 16% inferior àquela das bolas fundidas. O anexo III apresenta os resultados desse teste.

Rivera (2012) demonstrou que as bolas fundidas forneciam cerca de 2% a menos de energia que as bolas forjadas e as de alto cromo até 5,5%. Como as cargas utilizadas nos ensaios para bolas fundidas foram compostas por bolas com baixo e alto cromo, os resultados confirmam a comparação realizada por ele.

5.2 Testes de Desgaste

5.2.1 Caracterização das bolas

5.2.1.1 Análise Química

A Tabela 5.8 mostra a composição química das bolas que foram utilizadas nos ensaios.

Tabela 5.9 - Análise química dos corpos moedores

<i>Tipo</i>	<i>Carbono (%)</i>	<i>Manganês (%)</i>	<i>Silício (%)</i>	<i>Fósforo (%)</i>	<i>Enxofre (%)</i>	<i>Cromo (%)</i>
Fundida	0,85	0,96	0,40	0,034	0,041	0,39
Forjada	0,99	0,95	0,26	0,021	0,023	0,68

5.2.1.2 Análise de dureza

Os resultados de dureza dos corpos moedores estão apresentados na tabela 5.9.

Tabela 5.10 - Resultados de análise de dureza dos corpos moedores

Bolas	Dureza (HRc)
Fundidas	61,36
Forjadas	61,10

Nota-se que as bolas alto cromo apresentam uma dureza maior, o que as torna com um desgaste inferior ao das bolas baixo cromo. Como o intuito deste trabalho era avaliar as bolas forjadas bem como as bolas fundidas baixo cromo, desconsiderou-se as bolas fundidas alto cromo dos testes de desgaste. Nos ensaios de desgaste foram utilizadas somente as bolas fundidas de 60mm e as bolas forjadas de 63mm.

5.2.2 Ensaios Tecnológicos

Os testes de desgaste obtiveram os resultados apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.8 - Resultados dos testes de desgaste

Tempo (h)	Bolas Fundidas			Bolas Forjadas		
	Peso médio (g)	Diâmetro médio (mm)	Densidade (g/cm ³)	Peso médio (g)	Diâmetro médio (mm)	Densidade (g/cm ³)
0	30.721	197,21	7,65	31.680	197,95	7,80
1	30.683	197,13	7,65	31.660	197,91	7,80
2	30.665	197,09	7,65	31.655	197,90	7,80
3	30.654	197,06	7,65	31.652	197,89	7,80
4	30.645	197,04	7,65	31.643	197,88	7,80
5	30.627	197,01	7,65	31.636	197,86	7,80
6	30.620	196,99	7,65	31.634	197,86	7,80
7	30.617	196,98	7,65	31.630	197,85	7,80
8	30.611	196,97	7,65	31.623	197,84	7,80
9	30.606	196,96	7,65	31.617	197,82	7,80
10	30.603	196,96	7,65	31.611	197,81	7,80
11	30.602	196,95	7,65	31.608	197,80	7,80
12	30.597	196,94	7,65	31.603	197,79	7,80
13	30.593	196,93	7,65	31.599	197,78	7,80
14	30.589	196,92	7,65	31.594	197,77	7,80
15	30.584	196,91	7,65	31.589	197,76	7,80
16	30.579	196,90	7,65	31.584	197,75	7,80
17	30.574	196,89	7,65	31.579	197,74	7,80
18	30.571	196,89	7,65	31.574	197,73	7,80
19	30.566	196,88	7,65	31.570	197,72	7,80
20	30.562	196,87	7,65	31.565	197,71	7,80

As bolas fundidas apresentaram um consumo médio de 0,017mm/h, enquanto as bolas forjadas apresentaram um consumo de 0,012mm/h, ou seja, um consumo 30% menor. Essa elevada diferença é em função das primeiras cinco horas do teste, pois as bolas fundidas têm alta porosidade em sua superfície, o que acentua o seu desgaste inicial. O desgaste nesse período foi igual a 0,04mm/h, conforme demonstrado na figura 5.4.

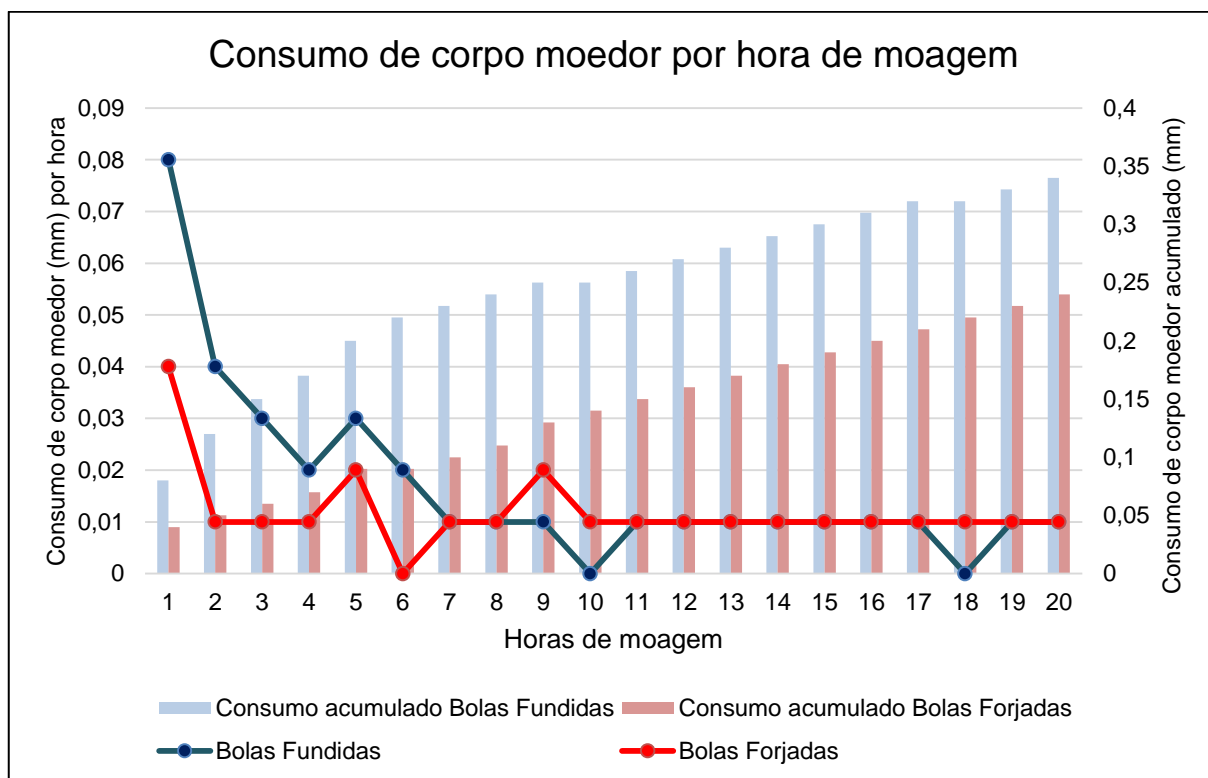


Figura 5.4 - Consumo de corpo moedor por hora de moagem e acumulado.

No teste de desgaste buscou-se a equalização da carga moedora, pois segundo PRENTICE (1943), *apud* MINTEK (1991), a abrasão é o fator predominante do desgaste e é proporcional a superfície da carga. Entretanto, como as densidades são diferentes, a carga das bolas forjadas ficou com uma massa maior e pela teoria de DAVIS (1919) que o desgaste de corpos moedores é atribuído principalmente ao impacto, ou seja, pela energia cinética que é função da massa, estas podem ter sido prejudicadas na comparação (MINTEK, 1991).

Durante o teste de desgaste a amostra de minério era substituída a cada hora, pois segundo CORRÊA (2005) o formato do abrasivo influencia no formato do sulco produzido no material.

6 CONCLUSÕES

As bolas forjadas mostraram-se mais eficientes que as bolas fundidas, tanto para os testes de eficiência de moagem quanto para o teste de desgaste.

Os testes de eficiência de moagem foram realizados de três maneiras, sendo a única diferença entre eles a composição da carga moedora. No primeiro teste, equalizou-se a massa de corpos moedores, tendo as bolas forjadas se apresentado 9,60% mais eficientes energeticamente que as bolas fundidas. No segundo teste, eliminou-se o diâmetro de 60mm das bolas forjadas, afim de se conseguir uma maior quantidade de carga moedora, já que as bolas forjadas possuem uma maior densidade que as bolas fundidas. Nessa situação as bolas forjadas foram 7,40% superiores às bolas fundidas. No terceiro teste, equalizou-se a massa e os diâmetros dos corpos moedores, sendo que as bolas forjadas foram 4,89% superiores às bolas fundidas.

O teste de desgaste foi realizado durante 20 horas, sendo que a cada hora, renovava-se a massa de minérios. Na média dessas 20 horas, as bolas forjadas apresentaram um desgaste 30% menor que as bolas fundidas. É sabido que as bolas fundidas apresentam um desgaste mais acentuado no início de operação, devido ao seu processo de fabricação, que as deixa com a superfície porosa. Portanto, retirando-se as primeiras 3 horas do teste, o desgaste das bolas se torna semelhante.

É importante ressaltar que o preço dessas bolas é diferente e deve ser levado em consideração, pois é um dos insumos mais caros e mais utilizados no tratamento de minérios.

7 RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

Os resultados demonstraram que existe diferença de moabilidade e desgaste entre as bolas forjadas e bolas fundidas, tendo as bolas forjadas melhores resultados.

Uma avaliação que deverá ser feita é o custo benefício, pois as bolas forjadas apresentam um custo superior ao das bolas fundidas.

Portanto, os resultados dessa dissertação facilitarão na tomada de decisões bem como na negociação com os fornecedores de corpos moedores, visando reduzir custos e aumentar a eficiência operacional.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por ser um campo amplo para estudos, devido aos seus altos custos e diversas formas de fabricação, sugiro como trabalhos futuros:

- 1) Estudar industrialmente as diferenças de moabilidade e desgaste entre bolas forjadas e bolas fundidas;
- 2) Estudar composições químicas diferentes para as bolas;
- 3) Estudar diferentes tipos de tratamentos térmicos para os corpos moedores.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTIN, E.; MORAES, S. L. Maximizing wear resistance of balls for grinding of coal. **Wear**, 263, pp. 43-47, 2007.

BABU, S.; RIBEIRO, D.; SHIVPURI, R. **Material and Surface Engineering for Precision Forging Dies**. The Ohio State University - Prepared for Precision Forging Consortium - Ohio Aerospace Institute and Nacional Center for Manufacturing Sciences, 1999.

BERALDO, J. L. **Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares**, São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1987.

BRAGA, L. F. **Simulação Computacional por Elementos finitos do Processo de Forjamento em Matriz Fechada de Rodas SAE 4140 de Utilização em Ponte rolante**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2005.

CASSOLA, M. S.; MORAES, S. L.; ALBERTIN, E. Desgaste na mineração: o caso dos corpos moedores. **Revista da Escola de Minas**, Vol. 59, Nº 2, pp. 173-178, Abr/Jun 2006.

CETLIN, P. R.; HELMAN, H. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**. 2a edição, 263 p. São Paulo, Artliber Editora, 2005.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios. Britagem, peneiramento e moagem**. São Paulo: Signus, pp. 562-649, 1999.

CHENJE, T.W.; SIMBI, D.J.; NAVARA, E. Wear performance and cost effectiveness—a criterion for the selection of grinding media for wet milling in mineral processing operations. **Minerals Engineering**, 16, pp. 1387-1390, 2003.

CLOOS, U. **Cylpebs: an alternative to balls as grinding media**. World Mining, 10/1983, p. 59, outubro, 1983.

CORRÊA, E. O. **Avaliação da resistência ao desgaste de ligas desenvolvidas para solda de revestimento duro para uso sob condições altamente abrasivas**. São Carlos: Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, 171 p. (Tese, Doutorado, Engenharia de Materiais), 2005.

DONDA, J. D. **Uma metodologia para prever o consumo específico de energia na remoagem de concentrados de minério de ferro**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 115 p. (Tese, Doutorado, Engenharia Metalúrgica e de Minas), 2003.

FIGUEIRA, H. V. O.; LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. Britagem e Moagem. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. Cap. 4, pp. 141-211.

GATES, J. D. **Two-body and three-body abrasion**: a critical discussion, *Wear* 214, pp. 139–146, 1998.

KRÜGER, F. L. **Corpos Moedores Côncavos**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 145 p. (Tese, Doutorado, Engenharia Metalúrgica e de Minas), 2004.

MINTEK (1991) **The selection of grinding balls for specific ores and the development of a suitable theory of ball wear**. Randburg, South Africa: MINTEK, 14p. (Application Report No. 10)

MULHEARN, T. O.; SAMUELS, L. E. The abrasion of metals: a model of the process, *Wear*, v. 5, pp. 478-498, 1962.

ORTEGA, P.; BERNARDINI, P.; TORRES, L. A. **Otimização do Tratamento Térmico de Desestabilização do Ferro Fundido Branco de Alto Cromo Classe II D Usado em Moinhos Rolo sobre Pista de Usinas Termoelétricas**. Disponível em: <http://www.tractebelenergia.com.br/wps/wcm/connect/eddd9a80-14f4-4297-bf2e-1d4956999095/11.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=eddd9a80-14f4-4297-bf2e-1d4956999095>>. Acesso em: 1 abr. 2014.

RIVERA, L. G. **Efecto del tipo de médio moedor em la eficiencia de molienda**. In: XII SIMPOSIO SOBRE PROCESAMIENTO DE MINERALES, Antofagasta, Chile, Nov/Dez 2012.

ROVERI, E.; CHAVES, A. P. Mecanismos de desgaste de corpos moedores em moinhos de bolas. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, Vol. 8, Nº 4, pp. 261-266, Out/Dez 2011.

ROWLAND, C. A. **Selection of of Rod Mills, Ball Mills, Pebble Mills and Re grind Mills**. In: MULAR, A. L.; GERALD II, V. J. Design and Installation of Comminution Circuits. New York, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., p. 393- 438, 1982.

SENAI.DR.MG. **Iniciação a fundição**. Belo Horizonte, 1987. 77p. il.(Publicação Técnica Fundição, 1).

SEPÚLVEDA, J. E. **Criterios para la selección, aplicación y evaluacion de médios de molienda**. In: ENCUESTRO DE PROCESSAMIENTO DE MINERALES, Antofagasta, Chile, p.1-36, 2006.

STROMBERG, J. Primer on hardfacing and rebuilding. *Welding & Metal Fabrication*, v. 50, n. 5, p. 212-215, June, 1982.

TAGGART, A. F. **Wet Grinding**. In: Taggart, A. F. Handbook of Mineral Dressing. 8th Printing, 1964. New York: John Wiley & Sons, Inc. Section 5, p5.1 – 5.133.

ZHOU, Y.; LU, Z.; ZHAN, M. An investigation of the erosion-corrosion characteristics of ductile cast iron. **Materials & Design**, 28, pp. 260-265, 2007.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and wear of materials**. Amsterdam: Elsevier, 560p, 1987.

10 ANEXOS

Anexo I – Testes de moagem

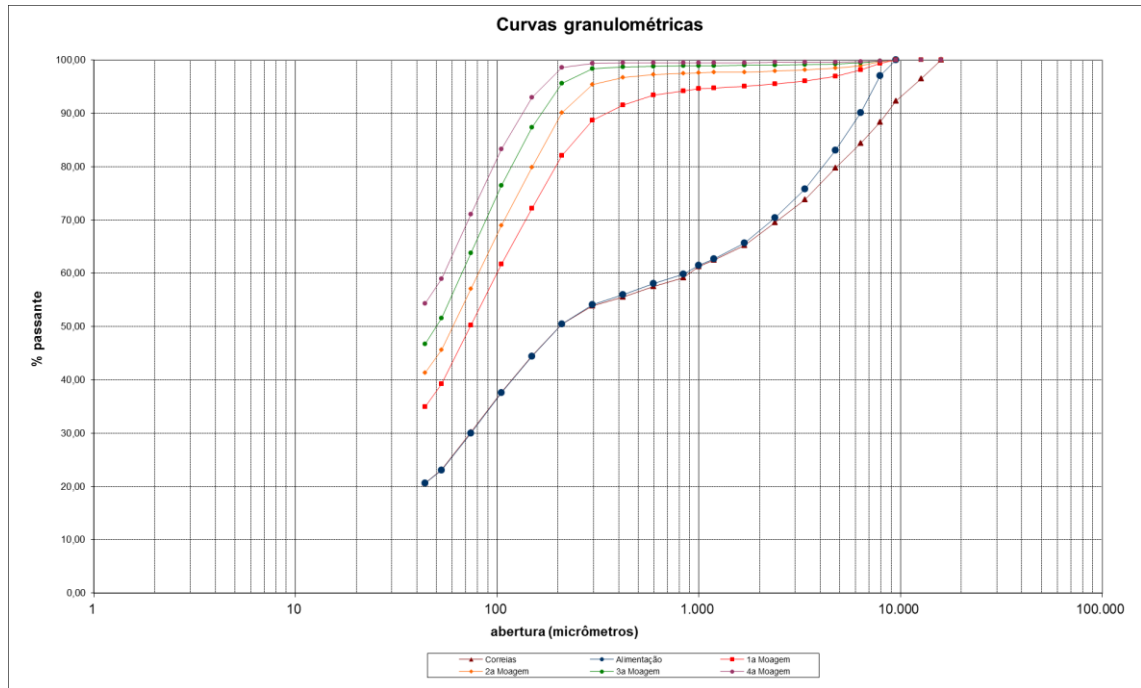


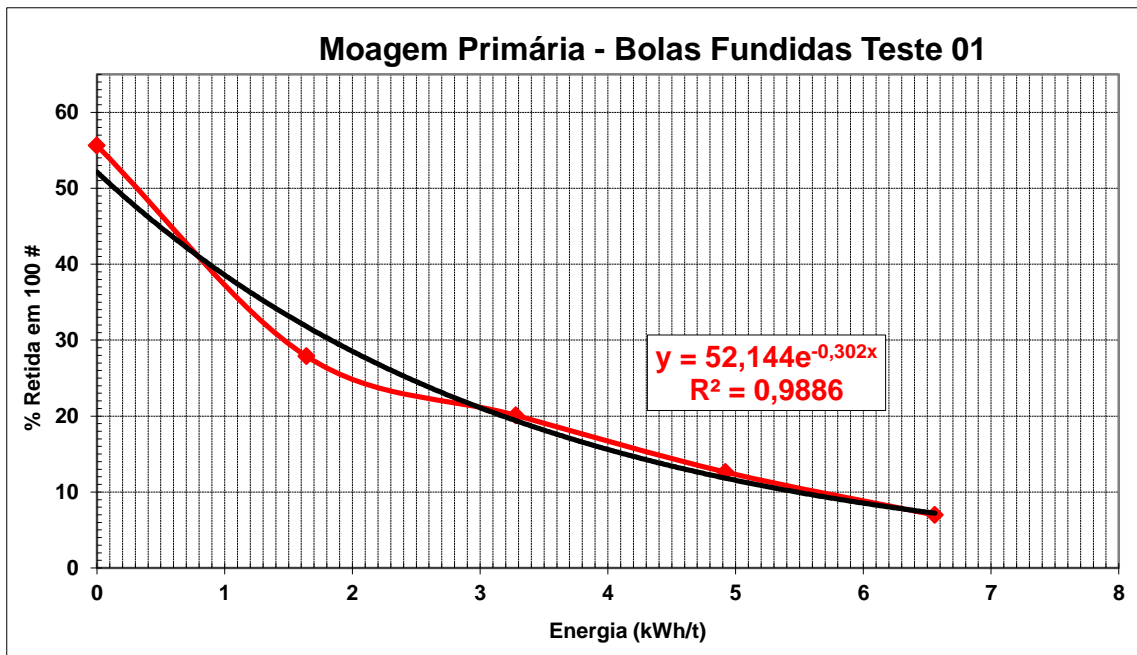
Laboratório Controle de Processo - LCP

Cálculo da Eficiência Energética
 Amostra: Alimentação De Correia

Resultados das moagens em laboratório - Bolas Fundidas - Teste 1

Peneiramento		Alimentação da moagem				Primeira moagem				Segunda moagem				Terceira moagem				Quarta moagem					
Malha Tyler	Abertura milímetros	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante		
5/8	15.875	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	
1/2	12.700	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	
3/8	9.525	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	
5/16	7.938	49,50	2,99	2,99	97,01	34,20	0,60	0,60	99,40	16,10	0,28	0,28	99,72	13,10	0,23	0,23	99,77	8,70	0,15	0,15	99,85	0,00	
1/4	6.350	113,70	6,88	9,87	90,13	69,20	1,22	1,83	98,17	47,80	0,84	1,13	98,87	13,50	0,24	0,47	99,53	8,20	0,14	0,30	99,70	0,00	
4	4.750	117,70	7,12	16,99	83,01	67,60	1,19	3,02	96,98	21,50	0,38	1,51	98,49	14,30	0,25	0,72	99,28	4,60	0,08	0,38	99,62	0,00	
6	3.360	119,40	7,22	24,20	75,80	52,40	0,93	3,95	96,05	21,70	0,38	1,89	98,11	6,90	0,12	0,84	99,16	2,40	0,04	0,42	99,58	0,00	
8	2.380	88,80	5,37	29,57	70,43	31,70	0,56	4,51	95,49	10,70	0,19	2,08	97,92	4,70	0,08	0,93	99,07	1,60	0,03	0,45	99,55	0,00	
10	1.680	78,30	4,73	34,31	65,69	25,80	0,46	4,96	95,04	9,00	0,16	2,24	97,76	4,10	0,07	1,00	99,00	2,00	0,04	0,49	99,51	0,00	
14	1.190	49,60	3,00	37,31	62,69	18,80	0,33	5,29	94,71	5,30	0,09	2,33	97,67	3,00	0,05	1,05	98,95	0,90	0,02	0,50	99,50	0,00	
16	1.000	19,50	1,18	38,49	61,51	2,60	0,05	5,34	94,66	1,00	0,02	2,35	97,65	1,10	0,02	1,07	98,93	0,30	0,01	0,51	99,49	0,00	
20	840	2,50	1,74	40,23	59,77	0,427	0,46	5,80	94,20	0,176	0,16	2,51	97,49	0,03	0,03	1,10	98,90	0,01	0,01	0,51	99,49	0,00	
28	595	2,53	1,77	42,00	58,00	0,701	0,76	6,56	93,44	0,211	0,20	2,71	97,29	0,05	0,05	1,16	98,84	0,01	0,01	0,52	99,48	0,00	
35	420	2,95	2,05	44,05	55,95	1,756	1,90	8,45	91,55	0,608	0,57	3,28	96,72	0,11	0,12	1,28	98,72	0,03	0,03	0,55	99,45	0,00	
48	297	2,64	1,84	45,89	54,11	2,625	2,83	11,29	88,71	1,381	1,29	4,56	95,44	0,34	0,36	1,63	98,37	0,05	0,06	0,61	99,39	0,00	
65	210	5,18	3,61	49,51	50,49	6,134	6,62	17,91	82,09	5,745	5,35	9,91	90,09	2,62	2,72	4,35	95,65	0,76	0,78	1,38	98,62	0,00	
100	149	8,75	6,10	55,61	44,39	9,244	9,98	27,88	72,12	10,939	10,18	20,09	79,91	7,98	8,28	12,63	87,37	5,47	5,58	6,97	93,03	0,00	
150	105	9,84	6,86	62,47	37,53	9,611	10,37	38,26	61,74	11,763	10,95	31,04	68,96	10,56	10,85	23,58	76,42	9,52	9,73	16,70	83,30	0,00	
200	74	10,82	7,55	70,01	29,99	10,674	11,52	49,78	50,22	12,825	11,94	42,98	57,02	12,19	12,64	36,22	63,78	12,03	12,29	28,99	71,01	0,00	
270	53	9,93	6,93	76,94	23,06	10,179	10,99	60,77	39,23	12,282	11,43	54,41	45,59	11,82	12,26	48,48	51,52	11,82	12,07	41,06	58,94	0,00	
325	44	3,55	2,48	79,42	20,58	3,948	4,26	65,03	34,97	4,602	4,28	58,70	41,30	4,67	4,84	53,32	46,68	4,48	4,58	45,64	54,36	0,00	
-325	44	29,51	20,58	100,00	---	32,40	34,97	100,00	---	44,37	41,30	100,00	---	45,02	46,68	100,00	---	53,22	54,36	100,00	---	0,00	
Massa Total 1		1653,80				5662,40				5663,20				5661,50				5660,10					
Massa Total 2		88,20				87,70				104,90				95,40				97,40					
tempo de moagem		0		0				5				10				15					20		
Energia (KWh/t)		0		0				1,64				3,28				4,92					6,56		



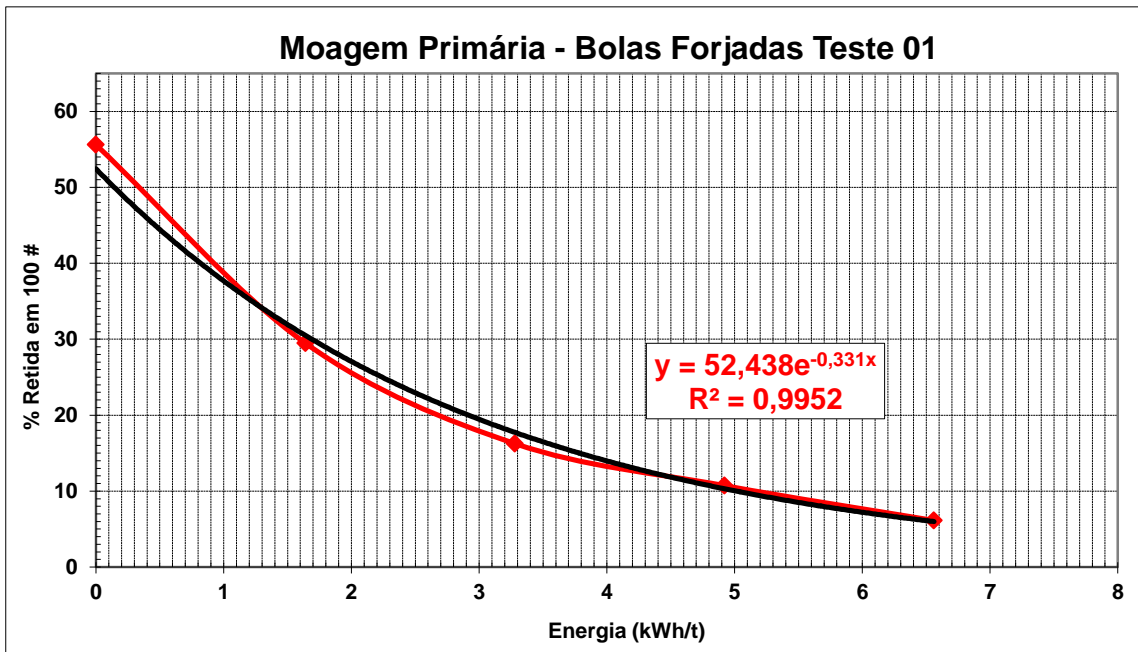
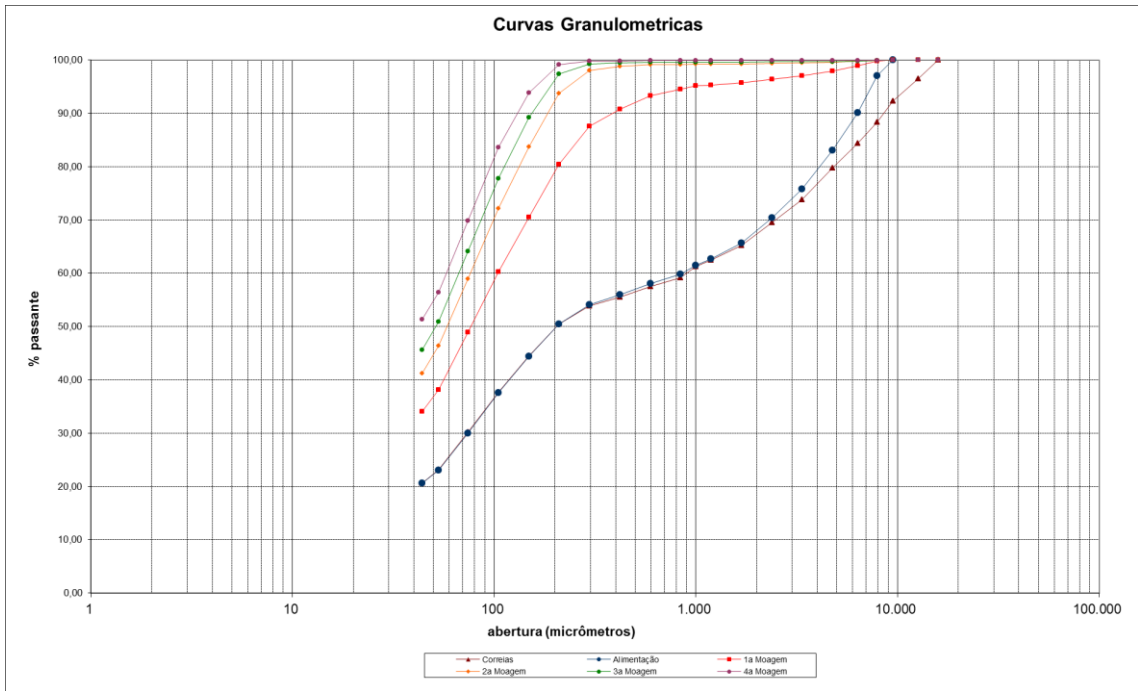


Laboratório Controle de Processo - LCP

Cálculo da Eficiência Energética
Amostra: Alimentação De Correia

Resultados das moagens em laboratório - Bolas Forjadas - Teste 01

Peneiramento		Alimentação da moagem				Primeira moagem				Segunda moagem				Terceira moagem				Quarta moagem					
Malha Tyler	Abertura micrômetros	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante		
5/8	15.875	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	
1/2	12.700	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	
3/8	9.525	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	
5/16	7.938	49,50	2,99	2,99	97,01	12,50	0,22	0,22	99,78	2,80	0,05	0,05	99,95	2,60	0,05	0,05	99,95	2,40	0,04	0,04	99,96	0,00	
1/4	6.350	113,70	6,88	9,87	90,13	46,50	0,82	1,04	98,96	10,00	0,18	0,23	99,77	8,00	0,14	0,19	99,81	1,20	0,02	0,06	99,94	0,00	
4	4.750	117,70	7,12	16,99	83,01	57,10	1,01	2,05	97,95	8,60	0,15	0,38	99,62	4,80	0,08	0,27	99,73	1,60	0,03	0,09	99,91	0,00	
6	3.360	119,40	7,22	24,20	75,80	49,50	0,87	2,92	97,08	8,10	0,14	0,52	99,48	2,00	0,04	0,31	99,69	0,40	0,01	0,10	99,90	0,00	
8	2.380	88,80	5,37	29,57	70,43	37,70	0,67	3,59	96,41	5,40	0,10	0,62	99,38	1,80	0,03	0,34	99,66	0,70	0,01	0,11	99,89	0,00	
10	1.680	78,30	4,73	34,31	65,69	36,60	0,65	4,24	95,76	5,60	0,10	0,72	99,28	1,40	0,02	0,36	99,64	0,30	0,01	0,12	99,88	0,00	
14	1.190	49,60	3,00	37,31	62,69	29,10	0,51	4,75	95,25	3,40	0,06	0,78	99,22	1,10	0,02	0,38	99,62	0,20	0,00	0,12	99,88	0,00	
16	1.000	19,50	1,18	38,49	61,51	2,90	0,05	4,80	95,20	0,60	0,01	0,79	99,21	0,20	0,00	0,39	99,61	0,00	0,00	0,12	99,88	0,00	
20	840	2,50	1,74	40,23	59,77	0,653	0,71	5,51	94,49	0,037	0,04	0,83	99,17	0,03	0,03	0,42	99,58	0,01	0,01	0,13	99,87	0,00	
28	595	2,53	1,77	42,00	58,00	1,078	1,17	6,68	93,32	0,074	0,08	0,91	99,09	0,02	0,02	0,44	99,56	0,01	0,01	0,13	99,87	0,00	
35	420	2,95	2,05	44,05	55,95	2,355	2,56	9,25	90,75	0,276	0,31	1,21	98,79	0,05	0,06	0,50	99,50	0,02	0,02	0,15	99,85	0,00	
48	297	2,64	1,84	45,89	54,11	2,948	3,21	12,45	87,55	0,684	0,76	1,97	98,03	0,18	0,20	0,69	99,31	0,03	0,04	0,19	99,81	0,00	
65	210	5,18	3,61	49,51	50,49	6,503	7,08	19,53	80,47	3,853	4,26	6,23	93,77	1,68	1,88	2,57	97,43	0,64	0,71	0,89	99,11	0,00	
100	149	8,75	6,10	55,61	44,39	9,149	9,95	29,48	70,52	9,062	10,02	16,26	83,74	7,29	8,15	10,73	89,27	4,71	5,24	6,13	93,87	0,00	
150	105	9,84	6,86	62,47	37,53	9,414	10,24	39,73	60,27	10,518	11,63	27,89	72,11	10,27	11,60	22,22	77,78	9,22	10,25	16,37	83,63	0,00	
200	74	10,82	7,55	70,01	29,99	10,432	11,35	51,08	48,92	11,879	13,14	41,03	58,97	12,19	13,64	35,87	64,13	12,41	13,79	30,17	69,83	0,00	
270	53	9,93	6,93	76,94	23,06	9,900	10,77	61,85	38,15	11,432	12,64	53,67	46,33	11,78	13,18	49,05	50,95	12,06	13,40	43,56	56,44	0,00	
325	44	3,55	2,48	79,42	20,58	3,810	4,15	65,99	34,01	4,600	5,09	58,76	41,24	4,78	5,35	54,40	45,60	4,64	5,15	48,71	51,29	0,00	
-325	44	29,51	20,58	100,00	---	31,26	34,01	100,00	---	37,29	41,24	100,00	---	40,74	45,60	100,00	---	46,18	51,29	100,00	---	0,00	
Massa Total 1		1653,80				5663,10				5663,00				5662,60				5662,10					0,00
Massa Total 2		88,20				87,50				89,70				89,00				89,90					0,00
Tempo de moagem		0		0				5				10				15					20		
Energia (kWh/t)		0		0				1,64				3,28				4,92					6,56		



Anexo II – Testes de moagem



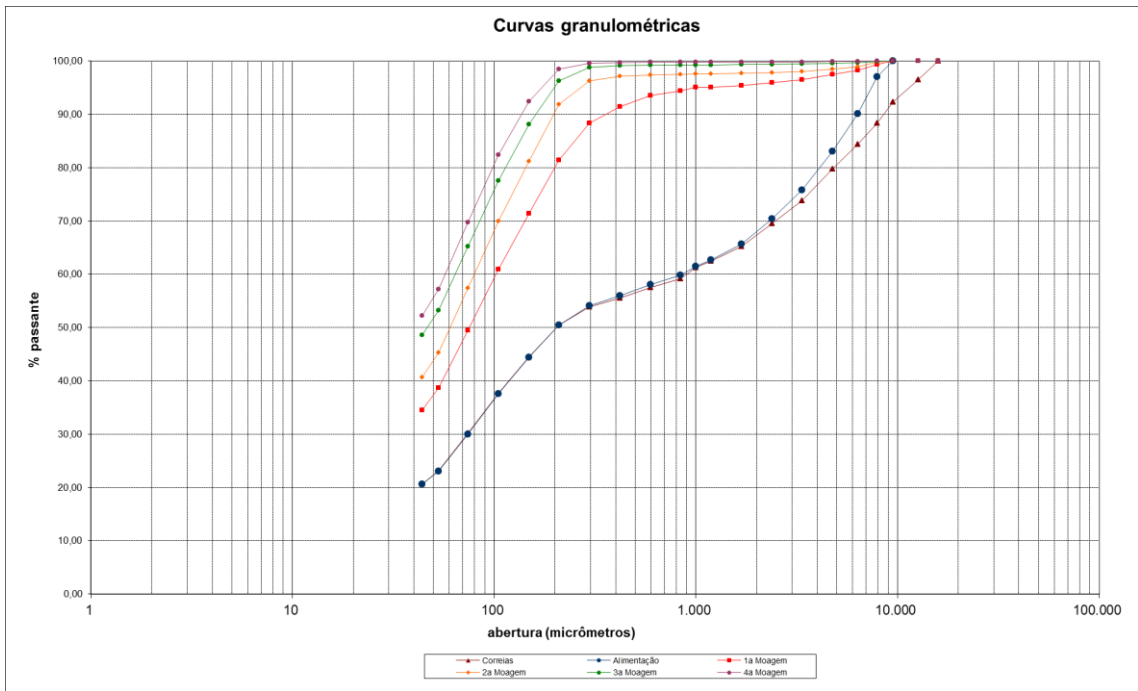
Laboratório Controle de Processo - LCP

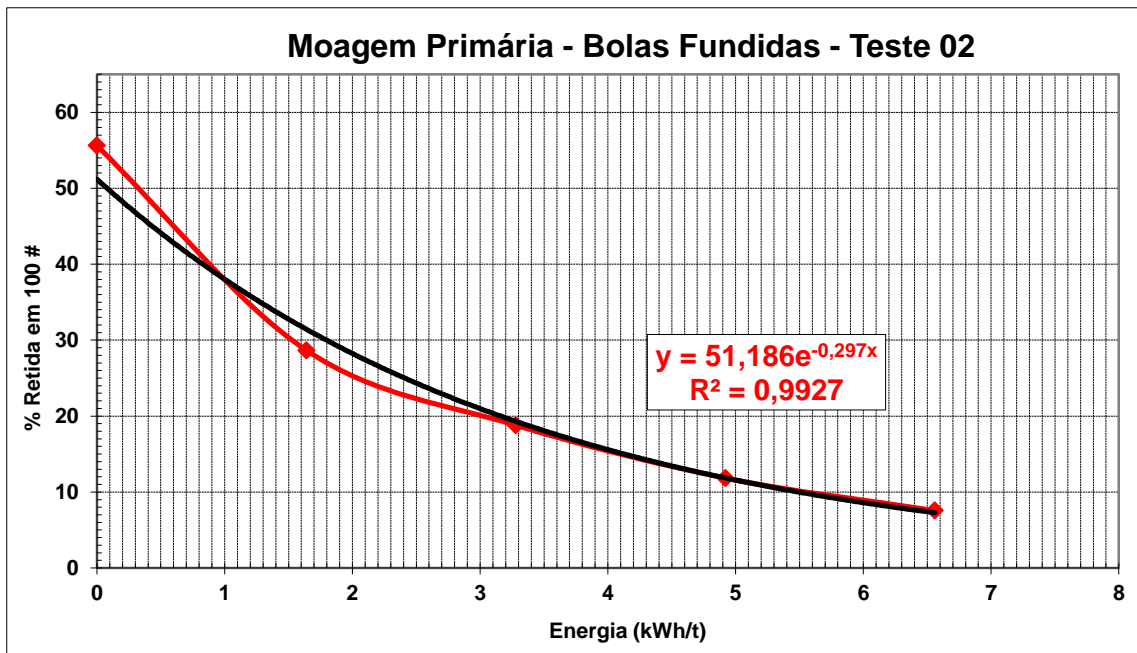
Cálculo da Eficiência Energética

Amostra: Alimentação De Correia

Resultados das moagens em laboratório - Bolas Fundidas - Teste 02

Malha Tyler	Abertura micrômetros	Alimentação da moagem				Primeira moagem				Segunda moagem				Terceira moagem				Quarta moagem				
		Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	
5/8	15,875	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
1/2	12,700	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
3/8	9,525	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
5/16	7,938	49,50	2,99	2,99	97,01	36,00	0,64	0,64	99,36	9,00	0,16	0,16	99,84	3,30	0,06	0,06	99,94	1,40	0,02	0,02	99,98	
1/4	6,350	113,70	6,88	9,87	90,13	61,80	1,09	1,73	98,27	53,00	0,94	1,09	98,91	15,20	0,27	0,33	99,67	2,80	0,05	0,07	99,93	
4	4,750	117,70	7,12	16,99	83,01	47,20	0,83	2,56	97,44	23,10	0,41	1,50	98,50	6,20	0,11	0,44	99,56	2,80	0,05	0,12	99,88	
6	3,360	119,40	7,22	24,20	75,80	50,50	0,89	3,45	96,55	24,30	0,43	1,93	98,07	5,90	0,10	0,54	99,46	1,70	0,03	0,15	99,85	
8	2,380	88,80	5,37	29,57	70,43	33,30	0,59	4,04	95,96	11,70	0,21	2,14	97,86	3,90	0,07	0,61	99,39	1,10	0,02	0,17	99,83	
10	1,680	78,30	4,73	34,31	65,69	28,60	0,51	4,55	95,45	9,30	0,16	2,30	97,70	2,90	0,05	0,66	99,34	0,80	0,01	0,19	99,81	
14	1,190	49,60	3,00	37,31	62,69	19,90	0,35	4,90	95,10	3,30	0,06	2,36	97,64	1,70	0,03	0,69	99,31	0,50	0,01	0,20	99,80	
16	1,000	19,50	1,18	38,49	61,51	2,30	0,04	4,94	95,06	0,90	0,02	2,38	97,62	0,40	0,01	0,70	99,30	0,10	0,00	0,20	99,80	
20	840	2,50	1,74	40,23	59,77	0,66	0,66	5,60	94,40	0,109	0,10	2,47	97,53	0,04	0,04	0,74	99,26	0,00	0,00	0,20	99,80	
28	595	2,53	1,77	42,00	58,00	0,779	0,87	6,48	93,52	0,103	0,09	2,56	97,44	0,04	0,05	0,79	99,21	0,03	0,03	0,22	99,78	
35	420	2,95	2,05	44,05	55,95	1,869	2,10	8,57	91,43	0,339	0,30	2,86	97,14	0,09	0,11	0,90	99,10	0,05	0,04	0,27	99,73	
48	297	2,64	1,84	45,89	54,11	2,728	3,06	11,64	88,36	1,021	0,90	3,76	96,24	0,25	0,31	1,20	98,80	0,11	0,10	0,36	99,64	
65	210	5,18	3,61	49,51	50,49	6,171	6,93	18,56	81,44	4,968	4,37	8,13	91,87	2,07	2,57	3,77	96,23	1,25	1,13	1,49	98,51	
100	149	8,75	6,10	55,61	44,39	8,993	10,09	28,66	71,34	12,108	10,66	18,79	81,21	6,51	8,08	11,84	88,16	6,74	6,06	7,55	92,45	
150	105	9,84	6,86	62,47	37,53	9,255	10,39	39,04	60,96	12,790	11,26	30,05	69,95	8,51	10,57	22,41	77,59	11,18	10,05	17,60	82,40	
200	74	10,82	7,55	70,01	29,99	10,202	11,45	50,49	49,51	14,245	12,54	42,59	57,41	9,98	12,39	34,80	65,20	14,06	12,64	30,24	69,76	
270	53	9,93	6,93	76,94	23,06	9,630	10,81	61,30	38,70	13,758	12,11	54,70	45,30	9,68	12,01	46,81	53,19	14,02	12,61	42,85	57,15	
325	44	3,55	2,48	79,42	20,58	3,780	4,24	65,54	34,46	5,316	4,68	59,38	40,62	3,70	4,60	51,41	48,59	5,51	4,95	47,80	52,20	
-325	44	29,51	20,58	100,00	---	30,70	34,46	100,00	---	46,14	40,62	100,00	---	39,15	48,59	100,00	---	58,05	52,20	100,00	---	
Massa Total 1		1653,80	---	---	---	5661,80	---	---	---	5661,50	---	---	---	5660,60	---	---	---	5658,50	---	---	---	---
Massa Total 2		88,20	---	---	---	84,70	---	---	---	110,90	---	---	---	80,00	---	---	---	111,00	---	---	---	---
Tempo de moagem		0	---	0	---	5	---	5	---	10	---	10	---	15	---	15	---	20	---	20	---	
Energia (KWh/t)		0	---	0	---	1,64	---	1,64	---	3,28	---	3,28	---	4,92	---	4,92	---	6,56	---	6,56	---	



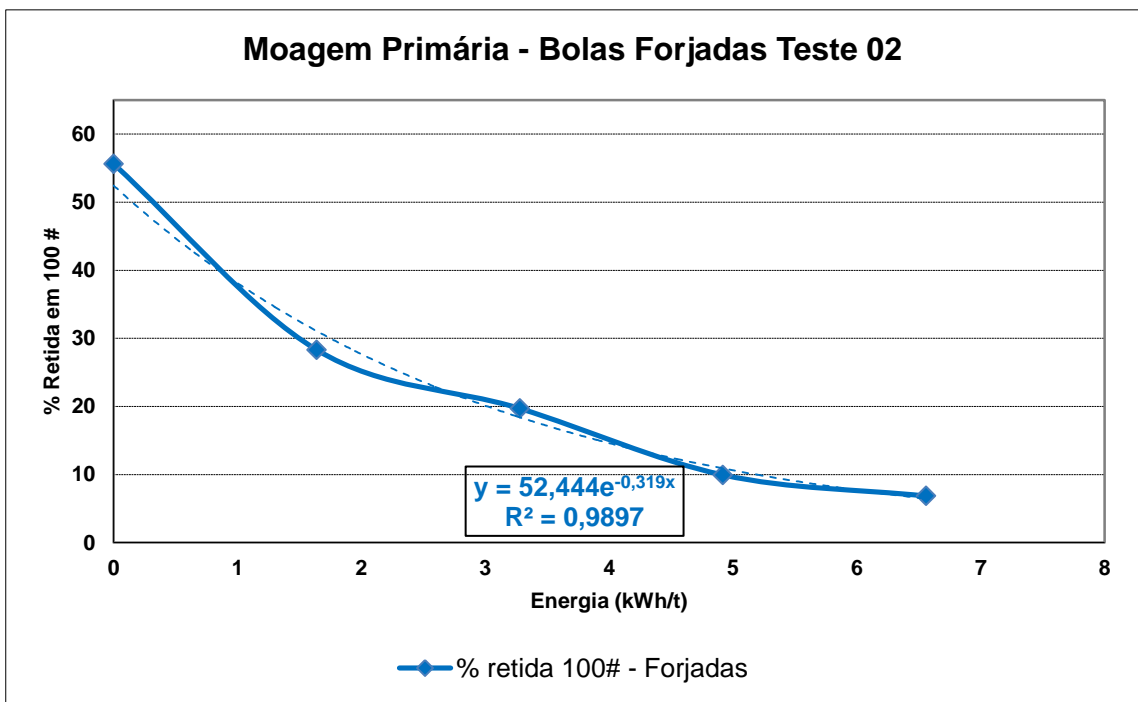
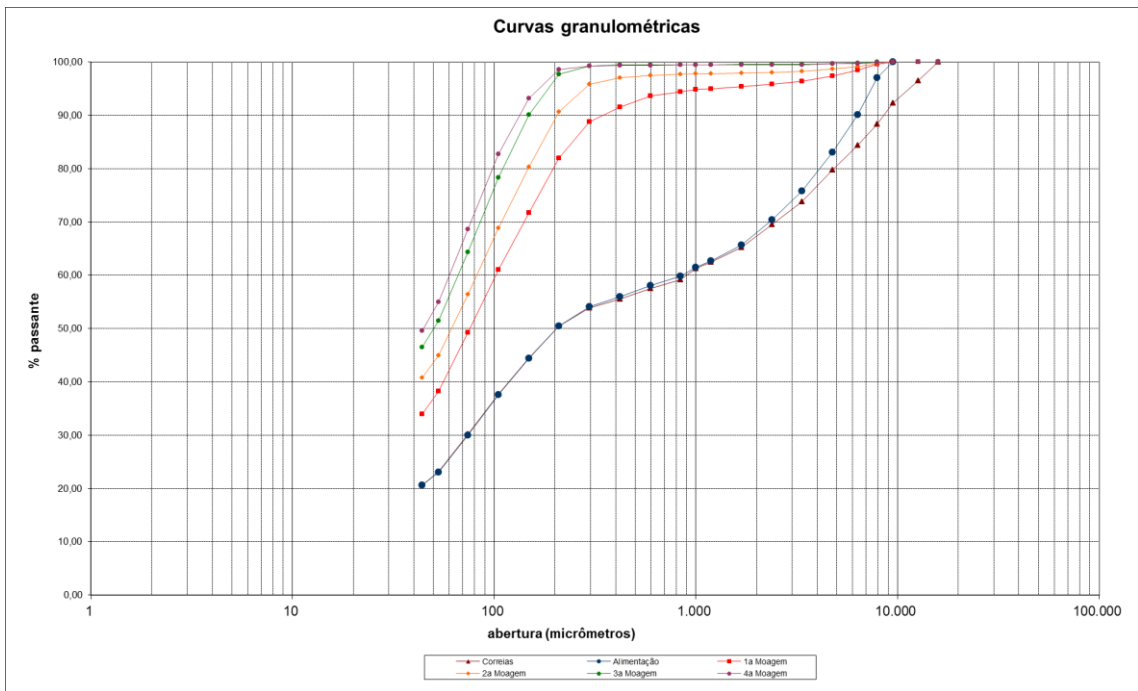


Laboratório Controle de Processo - LCP

Cálculo da Eficiência Energética
Amostra: Alimentação De Correia

Resultados das moagens em laboratório - Bolas Forjadas - Teste 02

Peneiramento		Alimentação da moagem				Primeira moagem				Segunda moagem				Terceira moagem				Quarta moagem					
Malha Tyler	Abertura micrômetros	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante		
5/8	15.875	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	
1/2	12.700	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	
3/8	9.525	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	
5/16	7.938	49,50	2,99	2,99	97,01	22,70	0,40	0,40	99,60	16,60	0,29	0,29	99,71	1,40	0,02	0,02	99,98	4,60	0,08	0,08	99,92	0,08	
1/4	6.350	113,70	6,88	9,87	90,13	65,40	1,15	1,56	98,44	32,40	0,57	0,87	99,13	9,20	0,16	0,19	99,81	10,80	0,19	0,27	99,73	0,27	
4	4.750	117,70	7,12	16,99	83,01	57,20	1,01	2,57	97,43	24,90	0,44	1,31	98,69	6,50	0,11	0,30	99,70	4,10	0,07	0,34	99,66	0,34	
6	3.360	119,40	7,22	24,20	75,80	59,30	1,05	3,61	96,39	22,10	0,39	1,70	98,30	5,30	0,09	0,40	99,60	7,30	0,13	0,47	99,53	0,47	
8	2.380	88,80	5,37	29,57	70,43	30,20	0,53	4,15	95,85	13,00	0,23	1,92	98,08	2,40	0,04	0,44	99,56	2,10	0,04	0,51	99,49	0,51	
10	1.680	78,30	4,73	34,31	65,69	27,70	0,49	4,63	95,37	9,50	0,17	2,09	97,91	1,40	0,02	0,46	99,54	2,00	0,04	0,55	99,45	0,55	
14	1.190	49,60	3,00	37,31	62,69	21,30	0,38	5,01	94,99	5,70	0,10	2,19	97,81	0,80	0,01	0,48	99,52	1,20	0,02	0,57	99,43	0,57	
16	1.000	19,50	1,18	38,49	61,51	10,90	0,19	5,20	94,80	1,50	0,03	2,22	97,78	0,30	0,01	0,48	99,52	0,10	0,00	0,57	99,43	0,57	
20	840	2,50	1,74	40,23	59,77	0,366	0,39	5,60	94,40	0,100	0,11	2,33	97,67	0,00	0,00	0,48	99,52	0,00	0,00	0,57	99,43	0,57	
28	595	2,53	1,77	42,00	58,00	0,702	0,76	6,36	93,64	0,122	0,14	2,47	97,53	0,03	0,03	0,51	99,49	0,02	0,03	0,59	99,41	0,59	
35	420	2,95	2,05	44,05	55,95	1,910	2,06	8,41	91,59	0,458	0,52	2,99	97,01	0,05	0,06	0,57	99,43	0,03	0,04	0,63	99,37	0,63	
48	297	2,64	1,84	45,89	54,11	2,600	2,80	11,22	88,78	1,051	1,19	4,18	95,82	0,11	0,13	0,70	99,30	0,06	0,07	0,70	99,30	0,70	
65	210	5,18	3,61	49,51	50,49	6,294	6,79	18,01	81,99	4,554	5,16	9,34	90,66	1,37	1,62	2,32	97,68	0,62	0,75	1,45	98,55	1,45	
100	149	8,75	6,10	55,61	44,39	9,549	10,30	28,30	71,70	9,139	10,35	19,70	80,30	6,44	7,61	9,94	90,06	4,41	5,39	6,84	93,16	6,84	
150	105	9,84	6,86	62,47	37,53	9,904	10,68	38,99	61,01	10,101	11,44	31,14	68,86	9,95	11,75	21,69	78,31	8,57	10,47	17,31	82,69	17,31	
200	74	10,82	7,55	70,01	29,99	10,891	11,75	50,73	49,27	10,980	12,44	43,58	56,42	11,84	14,00	35,69	64,31	11,55	14,11	31,42	68,58	31,42	
270	53	9,93	6,93	76,94	23,06	10,251	11,06	61,79	38,21	10,141	11,49	55,07	44,93	10,84	12,82	48,51	51,49	11,17	13,64	45,06	54,94	45,06	
325	44	3,55	2,48	79,42	20,58	3,944	4,25	66,04	33,96	3,703	4,20	59,27	40,73	4,21	4,98	53,49	46,51	4,41	5,38	50,45	49,55	50,45	
-325	44	29,51	20,58	100,00	---	31,49	33,96	100,00	---	10,14	11,49	70,76	---	39,35	46,51	100,00	---	40,57	49,55	100,00	---	---	
Massa Total 1		1653,80				5663,80				5662,70				5662,80				5661,30					
Massa Total 2		88,20				87,90				86,30				84,20				81,40					
Tempo de moagem		0		0				5				10				15					20		
Energia (kWh/t)		0		0				1,64				3,28				4,92					6,56		



Anexo III – Testes de moagem

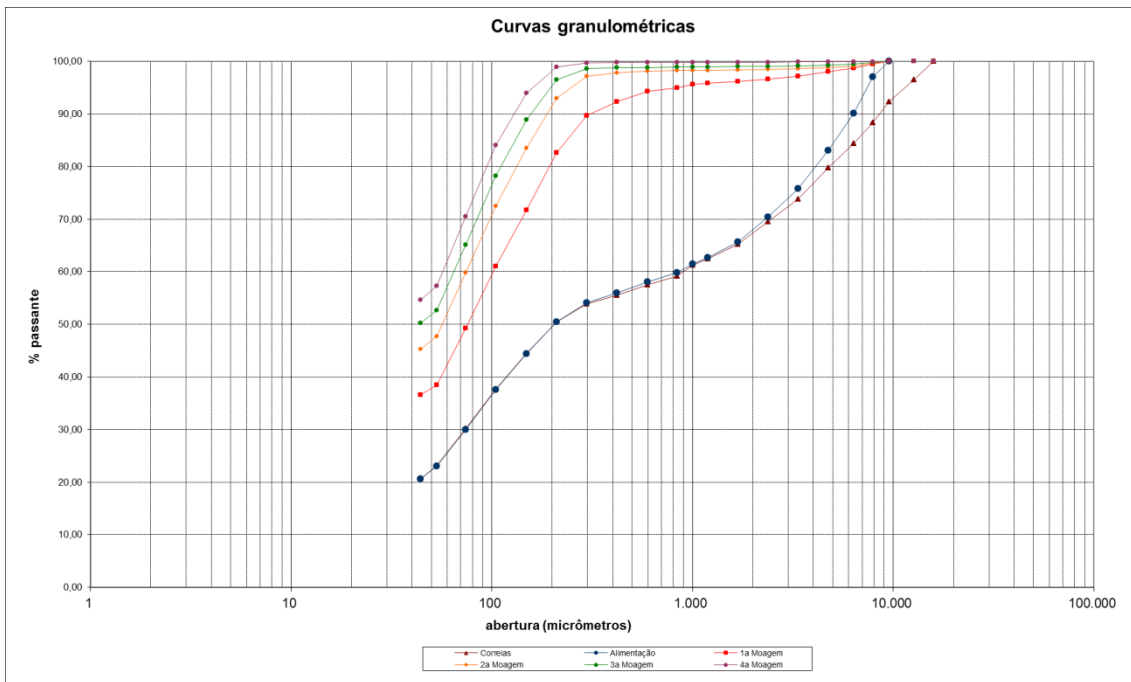


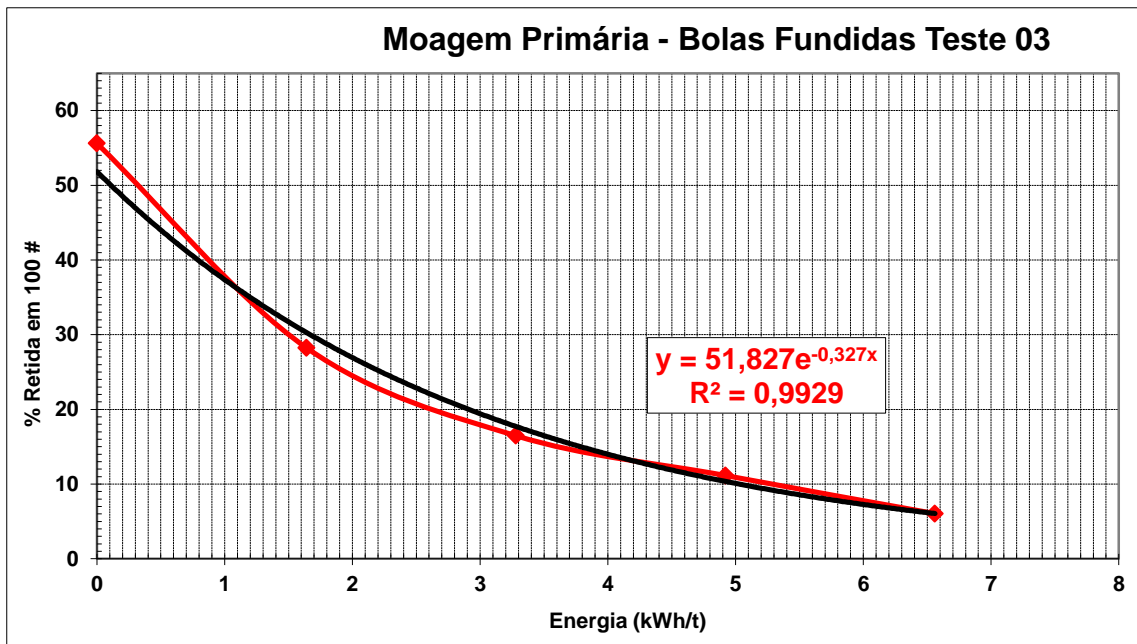
Laboratório Controle de Processo - LCP

Cálculo da Eficiência Energética
 Amostra: Alimentação De Correia

Resultados das moagens em laboratório - Bolas Fundidas - Teste 03

Peneiramento		Alimentação da moagem				Primeira moagem				Segunda moagem				Terceira moagem				Quarta moagem					
Malha Tyler	Abertura (micrômetros)	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante		
5/8	15.875	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
1/2	12.700	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
3/8	9.525	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
5/16	7.938	49,50	2,99	2,99	97,01	28,00	0,49	0,49	99,51	19,70	0,35	0,35	99,65	9,70	0,17	0,17	99,83	1,90	0,03	0,03	99,97	99,97	
1/4	6.350	113,70	6,88	9,87	90,13	45,40	0,80	1,30	98,70	34,80	0,61	0,96	99,04	22,90	0,40	0,58	99,42	3,00	0,05	0,09	99,91	99,91	
4	4.750	117,70	7,12	16,99	83,01	38,10	0,67	1,97	98,03	13,60	0,24	1,20	98,80	10,10	0,18	0,75	99,25	1,30	0,02	0,11	99,89	99,89	
6	3.360	119,40	7,22	24,20	75,80	49,50	0,87	2,84	97,16	12,00	0,21	1,41	98,59	5,60	0,10	0,85	99,15	1,50	0,03	0,14	99,86	99,86	
8	2.380	88,80	5,37	29,57	70,43	29,10	0,51	3,36	96,64	7,40	0,13	1,54	98,46	4,00	0,07	0,92	99,08	1,20	0,02	0,16	99,84	99,84	
10	1.680	78,30	4,73	34,31	65,69	27,40	0,48	3,84	96,16	5,80	0,10	1,64	98,36	3,70	0,07	0,99	99,01	1,50	0,03	0,18	99,82	99,82	
14	1.190	49,60	3,00	37,31	62,69	20,00	0,35	4,19	95,81	4,00	0,07	1,72	98,28	1,80	0,03	1,02	98,98	0,30	0,01	0,19	99,81	99,81	
16	1.000	19,50	1,18	38,49	61,51	11,40	0,20	4,40	95,60	1,70	0,03	1,75	98,25	1,30	0,02	1,04	98,96	0,30	0,01	0,19	99,81	99,81	
20	840	2,50	1,74	40,23	59,77	0,515	0,60	4,99	95,01	0,038	0,04	1,79	98,21	0,03	0,03	1,07	98,93	0,02	0,02	0,22	99,78	99,78	
28	595	2,53	1,77	42,00	58,00	0,606	0,70	5,69	94,31	0,086	0,10	1,89	98,11	0,05	0,06	1,13	98,87	0,01	0,01	0,23	99,77	99,77	
35	420	2,95	2,05	44,05	55,95	1,723	1,99	7,69	92,31	0,223	0,25	2,14	97,86	0,08	0,09	1,22	98,78	0,01	0,01	0,24	99,76	99,76	
48	297	2,64	1,84	45,89	54,11	2,257	2,61	10,30	89,70	0,643	0,73	2,88	97,12	0,19	0,22	1,44	98,56	0,05	0,05	0,29	99,71	99,71	
65	210	5,18	3,61	49,51	50,49	6,068	7,02	17,32	82,68	3,641	4,16	7,04	92,96	1,76	2,05	3,49	96,51	0,67	0,75	1,04	98,96	98,96	
100	149	8,75	6,10	55,61	44,39	9,439	10,83	28,25	71,75	8,259	9,44	16,47	83,53	6,54	7,65	11,14	88,86	4,46	5,00	6,04	93,96	93,96	
150	105	9,84	6,86	62,47	37,53	9,264	10,72	38,97	61,03	9,670	11,05	27,52	72,48	9,14	10,69	21,83	78,17	8,81	9,88	15,93	84,07	84,07	
200	74	10,82	7,55	70,01	29,99	10,184	11,79	50,76	49,24	11,115	12,70	40,22	59,78	11,13	13,01	34,84	65,16	12,07	13,53	29,46	70,54	70,54	
270	53	9,93	6,93	76,94	23,06	9,307	10,77	61,53	38,47	10,549	12,05	52,27	47,73	10,66	12,47	47,31	52,69	11,78	13,21	42,67	57,33	57,33	
325	44	3,55	2,48	79,42	20,58	1,656	1,92	63,45	36,55	2,123	2,43	54,70	45,30	2,10	2,46	49,77	50,23	2,39	2,68	45,35	54,65	54,65	
-325	44	29,51	20,58	100,00	---	31,58	36,55	100,00	---	39,65	45,30	100,00	---	42,95	50,23	100,00	---	48,73	54,65	100,00	---	---	
Massa Total 1		1653,80				5662,70				5661,30				5660,80				5662,90					
Massa Total 2		88,20	---	---	---	82,60	---	---	---	86,00	---	---	---	84,60	---	---	---	89,00	---	---	---	---	---
Tempo de moagem		0		0		5		5		10		10		15		15		20		20		20	
Energia (kWh/t)		0		0		1,64		1,64		3,28		3,28		4,92		4,92		6,56		6,56		6,56	





Laboratório Controle de Processo - LCP

Cálculo da Eficiência Energética

Amostra: Alimentação De Correia

Resultados das moagens em laboratório - Bolas Forjadas Teste 03

Peneiramento		Alimentação da moagem				Primeira moagem				Segunda moagem				Terceira moagem				Quarta moagem				
Malha Tyler	Abertura micrômetros	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	Massa (g)	% Ret. Simples	% Ret. Acumul.	% Pas-sante	
5/8	15.875	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
1/2	12.700	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
3/8	9.525	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
5/16	7.938	49,50	2,99	2,99	97,01	21,30	0,38	0,38	99,62	3,90	0,07	0,07	99,93	2,40	0,04	0,04	99,96	3,20	0,06	0,06	99,94	0,04
1/4	6.350	113,70	6,88	9,87	90,13	43,50	0,77	1,14	98,86	15,60	0,28	0,34	99,66	6,60	0,12	0,16	99,84	1,60	0,03	0,08	99,92	0,08
4	4.750	117,70	7,12	16,99	83,01	40,50	0,72	1,86	98,14	8,70	0,15	0,50	99,50	3,40	0,06	0,22	99,78	2,30	0,04	0,13	99,87	0,13
6	3.360	119,40	7,22	24,20	75,80	36,90	0,65	2,51	97,49	8,20	0,14	0,64	99,36	2,80	0,05	0,27	99,73	0,40	0,01	0,13	99,87	0,13
8	2.380	88,80	5,37	29,57	70,43	27,90	0,49	3,00	97,00	6,10	0,11	0,75	99,25	1,30	0,02	0,29	99,71	0,50	0,01	0,14	99,86	0,14
10	1.680	78,30	4,73	34,31	65,69	25,70	0,45	3,46	96,54	5,20	0,09	0,84	99,16	1,40	0,02	0,32	99,68	0,80	0,01	0,16	99,84	0,16
14	1.190	49,60	3,00	37,31	62,69	20,70	0,37	3,82	96,18	3,30	0,06	0,90	99,10	1,00	0,02	0,33	99,67	0,40	0,01	0,16	99,84	0,16
16	1.000	19,50	1,18	38,49	61,51	6,40	0,11	3,94	96,06	1,00	0,02	0,92	99,08	0,40	0,01	0,34	99,66	0,20	0,00	0,17	99,83	0,17
20	840	2,50	1,74	40,23	59,77	0,564	0,61	4,55	95,45	0,061	0,07	0,99	99,01	0,01	0,01	0,35	99,65	0,02	0,02	0,18	99,82	0,18
28	595	2,53	1,77	42,00	58,00	0,846	0,92	5,47	94,53	0,100	0,12	1,11	98,89	0,01	0,01	0,36	99,64	0,00	0,00	0,19	99,81	0,19
35	420	2,95	2,05	44,05	55,95	2,235	2,43	7,90	92,10	0,276	0,32	1,43	98,57	0,03	0,04	0,40	99,60	0,02	0,02	0,21	99,79	0,21
48	297	2,64	1,84	45,89	54,11	3,043	3,31	11,20	88,80	0,770	0,90	2,33	97,67	0,01	0,02	0,42	99,58	0,03	0,04	0,25	99,75	0,25
65	210	5,18	3,61	49,51	50,49	6,921	7,52	18,72	81,28	4,012	4,69	7,02	92,98	1,50	1,74	2,16	97,84	0,52	0,62	0,87	99,13	0,87
100	149	8,75	6,10	55,61	44,39	9,712	10,55	29,28	70,72	8,769	10,26	17,28	82,72	6,55	7,61	9,77	90,23	4,13	4,91	5,79	94,21	5,79
150	105	9,84	6,86	62,47	37,53	9,669	10,51	39,79	60,21	9,804	11,47	28,75	71,25	9,63	11,20	20,97	79,03	8,37	9,95	15,74	84,26	15,74
200	74	10,82	7,55	70,01	29,99	10,661	11,59	51,37	48,63	11,200	13,10	41,85	58,15	11,85	13,77	34,75	65,25	11,85	14,09	29,82	70,18	29,82
270	53	9,93	6,93	76,94	23,06	9,800	10,65	62,02	37,98	10,500	12,28	54,13	45,87	11,21	13,04	47,78	52,22	11,62	13,81	43,64	56,36	43,64
325	44	3,55	2,48	79,42	20,58	2,057	2,24	64,26	35,74	2,256	2,64	56,77	43,23	2,56	2,97	50,76	49,24	2,81	3,34	46,98	53,02	46,98
-325	44	29,51	20,58	100,00	---	32,89	35,74	100,00	---	36,95	43,23	100,00	---	42,35	49,24	100,00	---	44,61	53,02	100,00	---	53,02
Massa Total 1		1653,80				5663,40				5663,40	6625,03			5663,00				5662,80				
Massa Total 2		88,20				88,40				84,70	99,08			85,70				84,00				
Tempo de moagem		0		0				5				10					15					20
Energia (KWh/t)		0		0				1,64				3,28					4,92					6,56

