

OTIMIZAÇÃO DO CIRCUITO DE BRITAGEM SECUNDÁRIA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO DE PROCESSO

Luciano Tadeu Silva RAMOS* - Gerente Depto. Processo
Rhaufed Rodrigues dos SANTOS* - Eng. de Minas - Depto. Processo
Luiz Augusto MAPA* - Técnico de Mineração - Depto. Processo

* Companhia Vale do Rio Doce, Carajás, Parauapebas, Pará, Brasil

Resumo. A usina de beneficiamento de minério de ferro de Carajás se caracteriza pelo processamento de minério hematítico de alto teor bem como pela elevada produção anual (em torno de 40×10^6 t). Apesar dos produtos finais da usina ("Sinter Feed" e "Lump Ore") serem amostrados automaticamente com eficiência através da torre de amostragem, a coleta de amostras representativas de alguns fluxos intermediários se torna proibitiva em função da necessidade da paralização de transportadores de correia. A utilização de um simulador de processos tem sido de grande auxílio nos trabalhos de otimização de operações unitárias, bem como de alguns circuitos que constituem a usina. Este trabalho apresenta a otimização realizada na Britagem Secundária através da abertura deste circuito

Abstract. The Carajás Iron Ore Plant process a high grade ore (67% Fe) with a high production level per year (40×10^6 metric tons). Although final products (Lump Ore and Sinter Feed) samples are taken automatically with accuracy, intermediate samples are very difficult to obtain due to the necessity of stopping conveyor belts. The use of a mineral processing simulator has been very helpful in the optimization of unit operations of some internal circuits. This paper presents the optimization work carried out at the Secondary Crushing area by the circuit opening.

Palavras-Chave: Simulação, Otimização, Beneficiamento, Ferro

1. Introdução

Desde o “start-up” da usina de ferro de Carajás em dezembro de 1985, a Britagem Secundária opera em circuito fechado com peneiras vibratórias.

A possibilidade de abertura deste circuito já havia sido cogitada, embora, devido à impossibilidade de quantificar com precisão os efeitos causados nas operações subsequentes da usina, a modificação do circuito não foi implementada.

Com a utilização do “software” de simulação de processos “JKSimMet”, foi possível determinar as alterações causadas nas vazões de sólidos e nas distribuições granulométricas de fluxos intermediários com a abertura do circuito da Britagem Secundária.

Inicialmente foram realizadas amostragens em torno das operações unitárias de britagem e peneiramento envolvidas, visando calibração dos modelos matemáticos.

Foram avaliados os possíveis efeitos na granulometria dos produtos, partições em massa nos fluxos do Peneiramento Secundário e Terciário, bem como a variação do tamanho máximo de alimentação da Britagem Terciária. Paralelamente foram investigadas as influências de diferentes “blends” de alimentação, em termos granulométricos, no desempenho dos processos de peneiramento e britagem.

2. Descritivo da Usina

A usina de beneficiamento de minério de ferro de Carajás é constituída por operações unitárias de cominuição (através de britadores e moinhos), classificação (através de peneiras vibratórias, classificadores espirais e hidrociclones) e separação sólido-líquido (através de peneiras desaguadoras e espessadores de rejeitos).

A figura 01 apresenta o fluxograma da usina.

A usina se caracteriza pelo processamento de um “ROM” de elevado teor de Fe (67%) e elevada produção anual (em torno de 40×10^6 t), bem como pela flexibilidade em termos de desvios de alguns fluxos internos. Normalmente são produzidos dois produtos, um de granulometria mais fina denominado “Sinter Feed” (-6,35mm +0,15mm) e um granulado denominado de “Lump Ore” (-31,7mm +6,35mm). Caso seja necessário, o granulado gerado pode ser direcionado à moagem de barras, sendo então produzido apenas “Sinter Feed”. Outra

característica da usina é a distribuição de suas operações unitárias em diversas edificações, como mostra a figura 02.

A tabela I apresenta os principais equipamentos da usina de beneficiamento de minério de ferro de Carajás.

Considerando a área da Britagem Secundária, enfoque deste trabalho, o fechamento do circuito é feito através de peneiras vibratórias e de transportadores de correias que totalizam 360m de extensão.

TABELA I - Principais Equipamentos da Usina de Ferro Carajás

| <u>Área</u> | <u>Equipamento/Tamanho</u> | <u>Quantidade</u> |
|----------------------------|---|-------------------|
| Britagem | Grelha Vibratória/8'x16' | 02 |
| Primária | Britador Giratório/48"x74" | 01 |
| Britagem | Pen. Vibratória/8'x20' (Deck Simplex) | 06 |
| Secundária | Britador Cônico/7' | 03 |
| Britagem Terciária | Britador Cônico/7' | 06 |
| Peneiramento Secundário | Peneira Vibratória/8'x20' (Deck Duplo) | 12 |
| | Classificador Espiral/84" (Simplex) | 11 |
| | Peneira Desaguadora/6'x14' | 21 |
| | Peneira Desaguadora/4'x10' | 13 |
| | Bateria de 15 Ciclones/6" | 06 |
| Espessamento | Espessador de Rejeitos (80m de diâmetro) | 02 |
| Peneiramento Terciário | Peneira Vibratória/8'x20' (Deck duplo) | 06 |
| | Classificador Espiral/66" (Duplex) | 01 |
| | Peneira Desaguadora/4'x10' | 08 |
| Moagem | Molinos de Barras DPC (12,5'x18') | 02 |
| | Classificador Espiral/ 78" (Duplex) | 02 |
| | Peneira Desaguadora/6'x14' | 04 |

3. Procedimentos Experimentais

3.1. Amostragem e Processamento das Amostras

A amostragem na usina industrial foi realizada em duas etapas. A primeira, teve como objetivo obter dados de distribuições granulométricas e vazões de sólidos e água dos fluxos de alimentação e descarga, visando a calibração dos modelos matemáticos das operações unitárias envolvidas. A segunda compreendeu dados de 123 amostras de alimentação do Peneiramento Secundário (Figura 01). Estas amostras foram agrupadas de acordo com sua granulometria (A80) em fina, média e grossa. A tabela II apresenta as distribuições granulométricas médias destes grupos de amostras.

Para o processamento das amostras foi adotado o seguinte procedimento:

- 1) Peneiramento das amostras a umidade natural nas malhas de 50,8; 38,1; 32,0; 25,4; 19,1; 12,7; 9,52 e 6,35mm
- 2) Lavagem das frações retidas nas peneiras acima de 6,35mm para retirada de finos aderidos
- 3) Secagem das frações e pesagem

TABELA II - Distribuição Granulométrica de Amostras da Alimentação do Peneiramento Secundário

| Tipo de Alimentação | % Retido Acumulado nas malhas em mm | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 50,8 | 38,1 | 32,0 | 25,4 | 19,1 | 12,7 | 9,52 | 6,35 |
| Fina (A80 < 6,35mm) | 0,29 | 0,55 | 1,11 | 2,20 | 3,68 | 7,11 | 10,33 | 17,31 |
| Média (6,35 <= A80 < 25,4) | 1,84 | 3,45 | 4,46 | 6,79 | 8,67 | 13,18 | 16,95 | 25,41 |
| Grossa (A80 >= 25,4) | 13,00 | 17,35 | 19,75 | 21,73 | 23,88 | 27,71 | 31,26 | 37,92 |

3.2 Descrição dos Modelos Matemáticos Utilizados [1, 2]

3.2.1 Peneira Vibratória

A curva típica de eficiência para uma peneira vibratória é a mostrada na figura 03, onde observam-se três regiões.

A região B é a mais importante do ponto de vista do modelamento. Ela descreve a probabilidade de partículas de tamanho imediatamente abaixo da abertura da malha da peneira dirigirem-se ao “oversize”. Pode ser descrita pela equação de Whiten e White, apresentada abaixo:

$$E(x) = e^{1-TRN \cdot f_o \cdot (1-x/d)^k} \dots\dots\dots (1)$$

Onde $E(x)$ é a fração de partículas de tamanho x da alimentação que dirigem-se ao “oversize”, d é a malha da peneira, f_o é o percentual de área aberta da peneira, TRN é o parâmetro de eficiência associado ao número de tentativas ou “saltos” que uma partícula realiza na superfície da peneira e K é um parâmetro utilizado para ajuste do modelo, cujo valor típico é igual a 2.

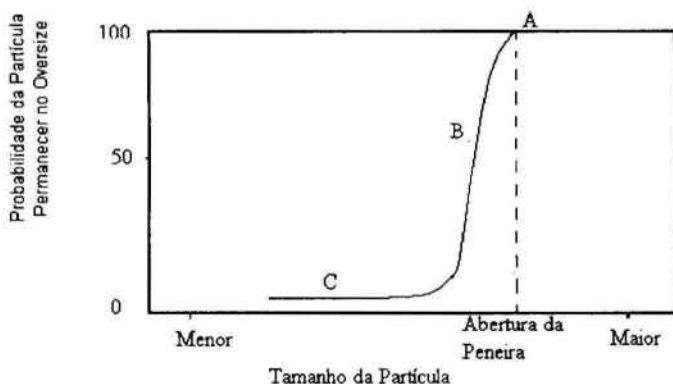


Figura 03 - Curva de Eficiência de uma Peneira Vibratória

3.2.2 Britador Cônico

Os componentes do modelo matemático do britador cônico e os fluxos internos dentro do modelo podem ser vistos na figura 04, apresentada a seguir.

Os vetores f , x e P representam as vazões massicas em cada fração granulométrica. A matriz triangular inferior B , conhecida como função de quebra, representa a distribuição relativa de partículas após a quebra, e a matriz diagonal C , denominada função de classificação, compreende a proporção de partículas de uma determinada fração granulométrica que entram na zona de quebra.

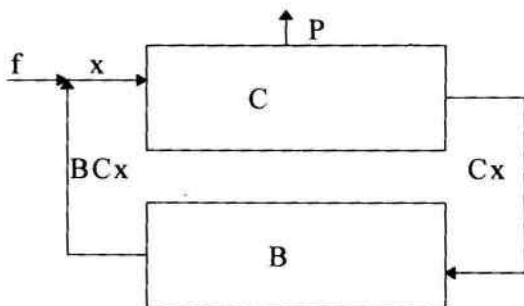


Figura 04 - Representação Simbólica do Modelo do Britador Cônico

A representação simbólica apresentada na figura 04 pode ser sintetizada na equação de Whiten para o britador cônico:

$$P = (I - C) \cdot (I - B \cdot C)^{-1} \cdot f \dots \dots \dots (2)$$

Onde I é a matriz unidade.

3.3 Simulação da Britagem Secundária

Devido às dificuldades inerentes à amostragem da alimentação nova da Britagem Secundária, utilizou-se para estimativa deste fluxo, dados referentes às amostras de alimentação do Peneiramento Secundário (Tabela II). Esta estimativa foi conseguida através do simulador de

processos “JKSimMet”, considerando em 50mm a abertura na posição fechada dos britadores secundários.

As distribuições granulométricas calculadas para os “blends” de alimentação nova da britagem secundária, e que foram utilizados nos trabalhos de simulação, estão apresentadas matematicamente nas equações (3), (4) e (5), obtidas por regressão linear.

Para alimentação grossa:

$$\ln(y) = 0,1427 \ln(x) + 3,85 \dots\dots\dots (3)$$

Para alimentação média:

$$\ln(y) = 0,0968 \ln(x) + 4,19 \dots\dots\dots (4)$$

Para alimentação fina:

$$\ln \{ \ln [100 / (100-y)] \} = 0,6896 \ln(x) - 0,80 \dots\dots\dots (5)$$

onde y = frequência acumulada passante no tamanho x (%).

As equações (3) e (4) são relativas ao método de Gates-Gaudin-Schumann, enquanto que a (5) é relativa ao método de Rosin-Rammler.

Os coeficientes de correlações para as equações (3), (4) e (5) foram, respectivamente, 92,6%, 94,5% e 98,1%.

A figura 05 mostra as curvas simuladas e as distribuições granulométricas reais de alimentação do Peneiramento Secundário, para os “blends” “grosso”, “médio” e “fino”.

Figura 05 - Curvas Granulométricas Simulada e Real da Alimentação do Peneiramento Secundário

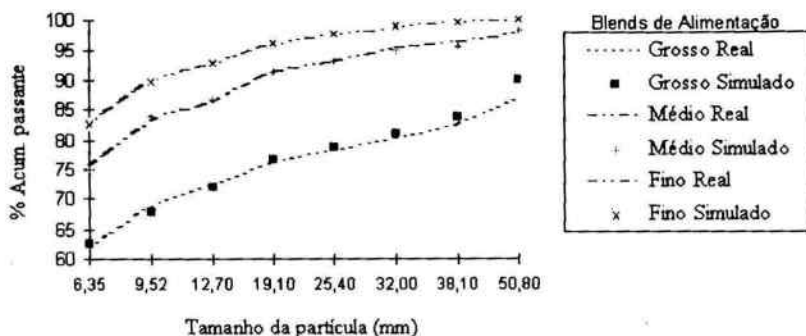


Figura 05 - Curvas Granulométricas Simulada e Real da Alimentação do Peneiramento Secundário

3.4 Simulações do Circuito Aberto x Fechado

Esta foi a principal etapa dos trabalhos de simulação, onde verificaram-se as consequências, em termos de granulometria e partição massica, da abertura do circuito da Britagem Secundária. Consideraram-se apenas as operações unitárias que seriam afetadas com a modificação do circuito. A figura 06 apresenta as operações unitárias envolvidas, bem como o balanço de massas, considerando uma alimentação "grossa", um dos três tipos de alimentação estudados.

São denominados SF2 e NP2 os materiais "fino" e granulado gerados no Peneiramento Secundário, respectivamente, enquanto que SF3 e NP3 são os materiais gerados no Peneiramento Terciário, similares aos SF2 e NP2. O "pebble" é o material retido no primeiro "deck" do Peneiramento Secundário.

As simulações de circuitos aberto e fechado da Britagem Secundária foram realizadas para os três tipos de alimentação e para a condição de produção de apenas "Sinter Feed" ou deste produto em conjunto com "Lump Ore".

Para cada condição de produção foram considerados ajustes específicos para a abertura dos britadores secundários e terciários, bem como selecionadas linhas específicas do Peneiramento Terciário para operação. Como pode ser observado na tabela I, o Peneiramento Terciário

possui 6 linhas de peneiras de duplo “deck” trabalhando em paralelo. Normalmente para a usina em plena capacidade, são necessárias apenas 3 linhas em operação. Esta situação permitiu empregar diferentes aberturas nos primeiros “decks” das peneiras, sendo mantida a abertura do segundo “deck” em 11mm. Para produção de “Lump Ore” são empregadas linhas com maior abertura no primeiro “deck” da peneira.

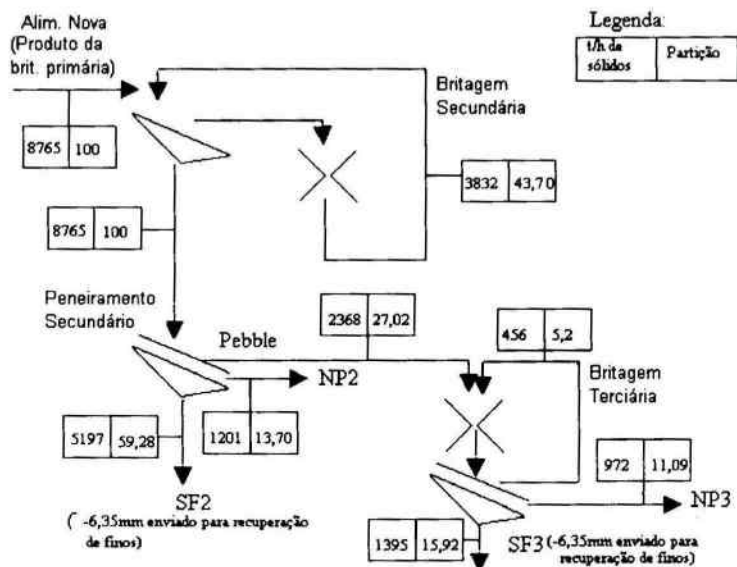


Figura 06 - Operações Unitárias Envolvidas na Simulação e Balanço de Massa para Alimentação “Grossa”

A tabela III apresenta o resultado das simulações, enfocando as partições dos fluxos intermediários, com relação ao Peneiramento Secundário, considerando circuitos aberto e fechado da Britagem Secundária.

Em termos de granulometria, a tabela IV apresenta o resultado das simulações, enfocando os produtos nas principais malhas granulométricas de controle dos fluxos intermediários (NP2, NP3, SF2 e SF3), considerando circuitos aberto e fechado na Britagem Secundária

4. Discussão dos Resultados

Observando a tabela III, constata-se que:

- Independentemente do tipo de alimentação, o fluxo SF2 (-6,35mm) praticamente não sofreu alteração na partição em massa com a abertura do circuito da Britagem Secundária, sendo o mesmo observado para o fluxo de NP3 (-31,7mm +6,35mm)

- Apenas para alimentação “grossa” ocorrem pequenas alterações nas partições em massa dos fluxos NP2 (-25mm +6,35mm), Pebble (-75mm +25mm) e SF3 (-6,35mm). Para o fluxo NP2 observa-se uma redução média de 1,35% com a abertura do circuito, enquanto que para os fluxos Pebble e SF3 um aumento médio de 2,71% e 2,07%, respectivamente.

De acordo com a tabela IV, as variações do percentual retido nas malhas granulométricas de controle foram praticamente desprezíveis com a abertura do circuito, sendo também observada uma maior influência da alimentação “grossa” para a fração +6,35mm do fluxo SF3, para a fração -6,35mm do NP2 e para a fração +31,7mm do NP3. No caso da fração +6,35mm do fluxo SF3 é observado também uma influência da alimentação “média”.

Atualmente, com o circuito fechado da Britagem Secundária, a alimentação da Britagem Terciária está abaixo de 75mm, limitada em função da malha da peneira da Britagem Secundária. Com a abertura do circuito, o “top size” de alimentação da Britagem Terciária passará a ser de 115mm, considerando-se o caso mais crítico que é a alimentação “grossa”, e uma abertura na posição fechada do britador secundário de 50mm.

5. Conclusões

Não há mudanças significativas nas partições em massa e nas malhas granulométricas de controle dos fluxos NP2, SF2, NP3 e SF3 com a abertura do circuito da Britagem Secundária (tabelas III e IV).

Com a abertura do circuito, o “top size” de alimentação da Britagem Terciária (115mm para uma alimentação “grossa”), ficará um pouco acima do valor máximo recomendado (112mm). Apesar disto, não se espera a ocorrência de problemas operacionais para os britadores terciários, uma vez que a alimentação do tipo “grossa” só ocorre com uma frequência de 5,7%

e, mesmo assim, nestas ocasiões, pode-se trabalhar com os britadores secundários com uma abertura na posição fechada (CSS) inferior a 50mm.

A abertura do circuito eliminaria a necessidade de reposição de três correias transportadoras utilizadas no fechamento do circuito, o que representa uma economia da ordem de US\$ 124.000,00.

Atualmente os gastos mensais com energia e manutenção (mão-de-obra e peças) com estes três transportadores de correia está em torno de US\$ 3.600,00

6. Referências Bibliográficas

1. LYNCH, A. J. Mineral Crushing and Grinding Circuits. Amsterdam, Elsevier Science Publishers, 1977. 340 p.
2. JKTech. JKSimMet Steady State Mineral Processing Simulator Manual. Austrália, JKTech, 1994. 380 p.

Tabela III - Partições em Massa dos Fluxos Intermediários da Usina para as Simulações de Circuitos Aberto e Fechado (%)

| Tipo de Alimentação | Condição de Produção | CSS (mm) Britador Secundário | CSS (mm) Britador Terciário | Abert. (mm) 1° deck Peneiramento Terciário (2 linhas em paralelo) | Partição em Massa % | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------|---|---------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | SF2 | | NP2 | | Pebble | | SF3 | | NP3 | |
| | | | | | CA | CF | CA | CF | CA | CF | CA | CF | CA | CF |
| Fina | Apenas SF | 50 | 22 | 25 e 38 | 78,35 | 78,36 | 16,33 | 16,34 | 5,33 | 5,30 | 2,35 | 2,34 | 2,98 | 2,96 |
| | LO + SF | 60 | 32 | 38 e 45 | 78,35 | 78,35 | 16,33 | 16,34 | 5,33 | 5,31 | 1,77 | 1,75 | 3,57 | 3,56 |
| Média | Apenas SF | 50 | 22 | 25 e 38 | 69,73 | 69,90 | 18,97 | 19,24 | 11,30 | 10,86 | 5,92 | 5,82 | 5,38 | 5,04 |
| | LO + SF | 60 | 32 | 38 e 45 | 69,71 | 69,88 | 18,94 | 19,21 | 11,35 | 10,91 | 4,71 | 4,50 | 6,64 | 6,40 |
| Grossa | Apenas SF | 50 | 22 | 25 e 38 | 58,48 | 59,30 | 12,87 | 14,22 | 28,65 | 26,48 | 18,63 | 16,88 | 10,02 | 9,60 |
| | LO + SF | 60 | 32 | 38 e 45 | 58,39 | 59,21 | 12,71 | 14,06 | 28,89 | 26,73 | 17,52 | 15,14 | 11,37 | 11,59 |

Legenda:

LO - Lump Ore

SF - Sinter Feed

CSS - Abertura posição fechada

CA - Circuito Aberto

CF - Circuito Fechado

Tabela IV - % Retidos nas Malhas de Controle Granulométrico para os Fluxos Intermediários da Usina/Simulações Cir. Aberto e Fechado

| Tipo de Alimentação | Condição de Produção | CSS(mm) Britador Secundário | CSS(mm) Britador Terciário | Abert (mm) 1o deck Peneiramento Terciário (2 linhas em paralelo) | Percentual retido nas malhas de controle | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------------|--|--|------|-------|-------|---------|-------|------|------|---------|-------|
| | | | | | +6,35mm | | | | -6,35mm | | | | +31,7mm | |
| | | | | | SF2 | | SF3 | | NP2 | | NP3 | | NP3 | |
| | | | | | CA | CF | CA | CF | CA | CF | CA | CF | CA | CF |
| Fina | Apenas SF | 50 | 22 | 25 e 38 | 2,81 | 2,81 | 13,21 | 12,97 | 36,05 | 36,03 | 0,58 | 0,58 | 0,52 | 0,53 |
| | LO + SF | 60 | 32 | 38 e 45 | 2,81 | 2,81 | 14,95 | 14,95 | 36,05 | 36,03 | 0,32 | 0,32 | 4,20 | 4,33 |
| Média | Apenas SF | 50 | 22 | 25 e 38 | 4,07 | 4,09 | 16,70 | 15,07 | 36,57 | 36,17 | 0,93 | 0,96 | 2,32 | 2,08 |
| | LO + SF | 60 | 32 | 38 e 45 | 4,06 | 4,08 | 18,43 | 16,69 | 36,61 | 36,22 | 0,60 | 0,59 | 9,05 | 9,32 |
| Grossa | Apenas SF | 50 | 22 | 25 e 38 | 2,56 | 2,70 | 18,87 | 16,93 | 23,29 | 21,83 | 1,62 | 1,51 | 3,58 | 3,48 |
| | LO + SF | 60 | 32 | 38 e 45 | 2,54 | 2,68 | 19,63 | 17,91 | 23,47 | 21,99 | 1,35 | 1,12 | 8,22 | 11,17 |

Legenda:

LO - Lump Ore

SF - Sinter Feed

CSS - Abertura Posição Fechada CA - Circuito Aberto

CF - Circuito Fechado

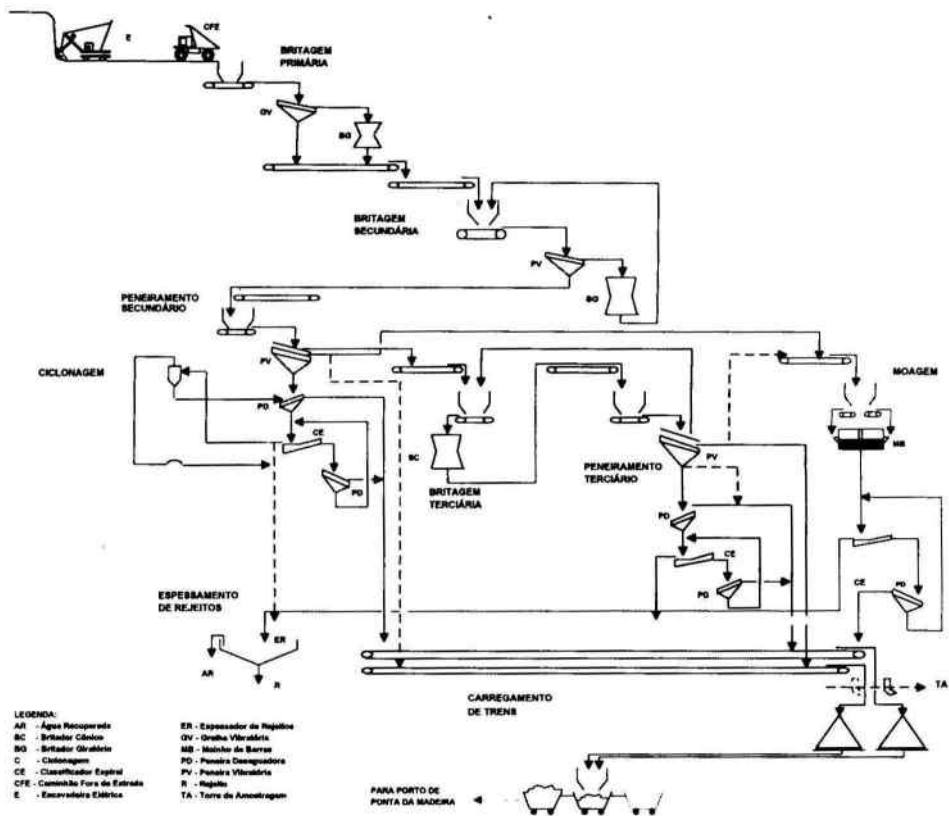


FIGURA 01 - FLUXOGRAMA DA USINA DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO DE CARAJÁS

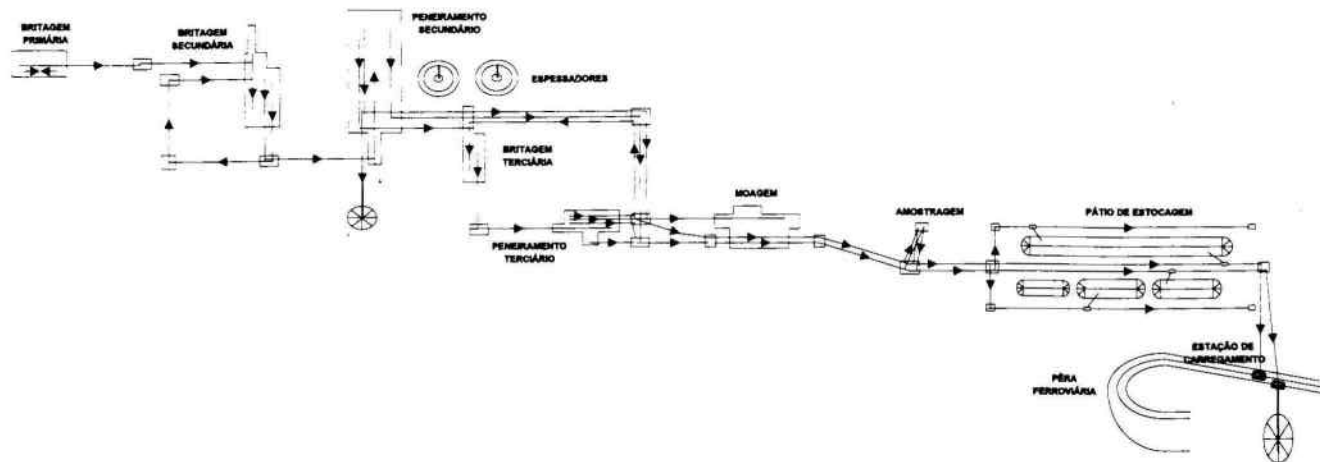


FIGURA 02 - PLANTA DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO DE CARAJÁS