

# APROVEITAMENTO DE ULTRAFINOS DE BAUXITA CONTIDO NO REJEITO DA MINERAÇÃO RIO DO NORTE<sup>1</sup>

Bianca Foggatto<sup>2</sup>  
Homero Delboni Junior<sup>3</sup>  
Paulo Sérgio Garcia de Mello<sup>4</sup>

## Resumo

Análises granuloquímicas conduzidas sobre amostras de rejeito da MRN indicaram haver teores diferenciados dos compostos de interesse em frações mais grossas desse material. Em particular, a fração retida em 0,020 mm apresentou enriquecimento significativo de alumina aproveitável e reduções importantes de sílica reativa e óxidos de ferro. Esses resultados motivaram o desenvolvimento de processo para aproveitamento dos minerais de interesse, de forma a aumentar a recuperação em massa do circuito industrial da MRN. O escopo dos trabalhos realizados incluiu o planejamento e realização de campanhas de ensaios de classificação do rejeito em escala piloto e o fechamento de balanços de massas e metalúrgicos, utilizando o programa *JKSimMet*. Através da análise de consistência dos resultados desses balanços foi definida a melhor configuração das etapas de classificação para recuperação dos rejeitos. Os equipamentos foram selecionados e as condições de operação foram definidas, de forma a obter um produto com teores dentro das especificações da MRN. Os resultados aqui obtidos foram posteriormente utilizados na modelagem matemática e dimensionamento da futura usina de recuperação de finos da MRN.

**Palavras-chave:** Bauxita; Aproveitamento de rejeitos; Ciclones.

## RECOVERY OF BAUXITE ULTRAFINES CONTAINED IN THE TAILINGS OF MINERAÇÃO RIO DO NORTE

### Abstract

Size and chemical analysis carried out on MRN tailing samples indicated relatively high grades of valuable minerals in coarser fractions. In particular, the fraction retained in 0,020 mm showed significant increase in available alumina and important reactive silica and iron oxides grade reductions. These results motivated the development of a process to recover the minerals of interest, in a way to increase the MRN industrial circuit mass recovery and production. The described work included planning and pilot plant testing campaigns on the MRN tailings, followed by mass and metallurgical balances using the *JKSimMet* simulator. Based on mass balance analysis a process was selected for establishing the circuit performance and operation conditions for achieving MRN specifications for their final product. The results here described were thus used in mathematical modeling and simulations, as the basis for the project of an extension of the MRN industrial plant.

**Key words:** Bauxite; Tailings recuperation; Cyclones.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro de Minas, Escola Politécnica da USP (Laboratório de Simulação e Controle - EPUSP).*

<sup>3</sup> *Engenheiro de Minas, M.E., Ph.D. (UQ, Austrália), Escola Politécnica da USP (Prof. Doutor do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo - EPUSP).*

<sup>4</sup> *Engenheiro de Minas, Departamento de Beneficiamento (Mineração Rio do Norte S.A.)*

## 1 INTRODUÇÃO

Análises granulométricas conduzidas sobre amostras de rejeito da MRN - Mineração Rio do Norte indicaram haver teores diferenciados dos compostos de interesse em frações mais grossas desse material. Em particular, a fração retida em 0,020 mm apresentou partição aproximada de 7% com enriquecimento significativo de alumina aproveitável (AA) e reduções importantes de sílica reativa (SR) e óxidos de ferro.<sup>(1)</sup>

Estes resultados motivaram a proposição de estudos de desenvolvimento de processo para aproveitamento dos minerais de interesse, de forma a aumentar a recuperação em massa, e portanto a produção do circuito industrial da MRN.

O presente trabalho teve por objetivo avaliar a viabilidade de aproveitamento de ultrafinos dos rejeitos da usina da MRN, localizada em Porto Trombetas, Pará. O escopo dos trabalhos realizados incluiu o planejamento e realização de campanhas de ensaios em escala piloto de classificação do rejeito, em instalação especialmente montada para tal fim, e o fechamento de balanços de massas e metalúrgicos, utilizando o programa *JKSimMet*.<sup>(2,3)</sup>

Através da análise de consistência dos resultados desses balanços foi definida a melhor configuração das etapas de classificação da usina da MRN para recuperação dos rejeitos. Os equipamentos foram selecionados e as condições de operação foram definidas de forma a obter um produto com teores dentro das especificações da MRN. Os resultados aqui obtidos foram posteriormente utilizados na modelagem matemática e dimensionamento da futura usina de recuperação de ultrafinos da MRN.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho experimental consistiu em conduzir ensaios de classificação em ciclones na própria usina industrial da MRN empregando-se o atual rejeito do processo. Para tanto foi montado um aparato que incluiu amostrador na tubulação de rejeito da usina, um conjunto formado por uma caixa de bomba e uma bomba de polpa, ciclones de vários diâmetros e configurações de orifícios, bem como material para coleta e condicionamento de amostras. Os ciclones empregados foram da marca Krebs, modelos D6-GMax 3079, D4-GMax 3052 e D2-GMax.

As amostragens dos fluxos de alimentação, *underflow* e *overflow* dos ciclones foram realizadas manualmente, mediante o emprego de canecas coletoras e técnica incremental.<sup>(4)</sup> A coleta de incrementos foi realizada a cada dez minutos durante o período de uma hora, e cada amostra foi composta pelos incrementos coletados no período planejado. A coleta de amostras foi planejada para períodos de uma hora, desde que usina da MRN se encontrasse estabilizada, isto é, em regime estacionário. Cada uma das amostras obtidas nos ensaios foi submetida às seguintes determinações:

- granulometria por peneiramento a úmido;
- porcentagens de sólidos; e
- composição química.

As determinações de granulometria por peneiramento a úmido e porcentagens de sólidos, bem como as análises químicas foram conduzidas nos laboratórios da própria MRN, em Porto Trombetas. As análises químicas incluíram a determinação de teores de alumina aproveitável (AA), sílica reativa (SR) e óxido de ferro.

Os ensaios foram conduzidos em três fases distintas, denominadas exploratória, de otimização e de consolidação. A fase exploratória consistiu em ensaios de classificação em um único estágio, com ciclones de 2", 4" e 6" de diâmetro. O objetivo desta fase foi analisar o desempenho de cada configuração de ciclone sob diversas condições de operação. A partir das análises dos resultados obtidos foram executados ensaios da segunda e da terceira fase que incluíram duas etapas de classificação em ciclones. Na fase de otimização várias combinações e configurações de ciclones foram testadas e os resultados empregados como base para a fase de consolidação, esta última utilizada como referência para a seleção da melhor configuração de ciclones das etapas de classificação para recuperação dos rejeitos da MRN.

A Figura 1 mostra a instalação montada para a condução dos ensaios.



Figura 1. Fotografia da usina piloto.

## 2.1 Fase Exploratória

A fase exploratória contou com 25 ensaios de classificação em ciclones com variações de diâmetros de *apex* e/ou *vortex* e/ou pressão de alimentação. Os ensaios foram realizados em uma única etapa em circuito aberto com alimentação de rejeito do circuito industrial.

A seqüência consistia em abertura da válvula que regulava o fluxo do produto do amostrador instalado no interior da tubulação de rejeito da usina industrial da MRN. O fluxo de polpa era encaminhado a uma caixa de bomba onde era continuamente bombeado para o ciclone montado para o ensaio específico. Uma vez ajustada a pressão de operação e, considerado em equilíbrio, os fluxos de alimentação, *underflow* e *overflow* eram amostrados de forma incremental, compondo assim uma única amostra de cada fluxo, para cada ensaio.

O sumário das condições de operação dos ensaios realizados na fase exploratória está listado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Ensaios da fase exploratória.

Ensaio	Dimensões do Ciclone e Pressão de Operação			
	Diâmetro do Ciclone	Vortex	Apex	Pressão
	(pol)	(mm)	(mm)	(kgf/cm <sup>2</sup> )
1	2	20	10,0	2,0
2	2	20	10,0	3,0
3	2	20	6,5	2,0
4	2	20	6,5	3,0
5	2	20	4,8	2,0
6	2	20	4,8	3,0
7	2	15	8,0	2,0
8	2	15	8,0	3,0
9	2	15	4,8	2,0
10	2	15	4,8	3,0
11	2	12	4,8	2,0
12	4	38	19,1	2,0
13	4	38	12,7	2,0
14	4	25	15,9	2,0
15	4	25	12,7	2,0
16	4	38	19,1	3,2
17	4	38	12,7	3,1
18	4	25	15,9	3,0
19	4	25	12,7	3,0
20	6	76	38,1	0,9
21	6	76	31,8	1,0
22	6	58	31,8	1,0
23	6	76	38,1	1,4
24	6	76	31,8	1,5
25	6	58	31,8	1,6

## 2.2 Fase de Otimização

Na fase de otimização os ensaios foram realizados em dois estágios, o primeiro em circuito aberto com alimentação direta de rejeito do circuito industrial e o segundo utilizando o *underflow* da primeira etapa em circuito fechado. Desta forma o primeiro estágio foi realizado nos mesmos moldes descritos para os ensaios da primeira fase, enquanto que o segundo estágio processou a polpa do *underflow* do primeiro estágio, devidamente acumulada e condicionada, em corotes de 100 litros. Tais ensaios exigiram portanto uma estratégia diferente e mais complexa, pois utilizou-se o mesmo conjunto caixa/bomba de polpa em ambas as etapas, para cada ensaio. Cada ensaio foi ainda conduzido em duplicata, afim de se criar uma base de dados mais robusta para a seleção da melhor configuração de ciclones.

Foram realizados 12 ensaios duplos (primeiro e segundo estágio) divididos em dois grupos, cada uma com combinações próprias de diâmetro de ciclone e pressões nos estágios primário e secundário. O estágio primário incluiu ciclones com 2 polegadas e 4 polegadas de diâmetro enquanto que o segundo somente ciclones de 2 polegadas.

Em cada bateria de ensaios houve variações de pressão de alimentação, conforme a combinação de diâmetros de *apex* e *vortex* selecionada. O sumário das condições de operação dos ensaios da fase de otimização é apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2.** Ensaio da fase de otimização.

Ensaio	Dimensões do Ciclone e Pressão de Operação							
	Primeiro Estágio				Segundo Estágio			
	Diâmetro do Ciclone (pol)	Vortex (mm)	Apex (mm)	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Diâmetro (pol)	Vortex (mm)	Apex (mm)	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )
1.1	4	38,1	12,7	3,0	2	20	6,5	2,2
1.2	4	38,1	12,7	3,0	2	20	6,5	2,2
2.1	4	38,1	12,7	2,0	2	20	6,5	1,8
2.2	4	38,1	12,7	2,0	2	20	6,5	1,8
3.1	4	38,1	12,7	3,5	2	20	6,5	3,2
3.2	4	38,1	12,7	3,5	2	20	6,5	3,2
4.1	2	20	6,5	2,0	2	20	6,5	2,2
4.2	2	20	6,5	2,0	2	20	6,5	2,2
5.1	2	20	6,5	1,6	2	20	6,5	1,8
5.2	2	20	6,5	1,6	2	20	6,5	1,8
6.1	2	20	6,5	2,8	2	20	6,5	3,2
6.2	2	20	6,5	2,8	2	20	6,5	3,2

### 2.3 Fase de Consolidação

Na fase de consolidação os ensaios foram realizadas em dois estágios de ciclonação, seguindo-se os procedimentos descritos para a fase de otimização. Foram realizados quatro ensaios divididos em dois grupos, cada uma com combinações próprias de diâmetro de ciclone e pressões nos estágios primário e secundário. O estágio primário incluiu ciclones com 6 polegadas e 4 polegadas de diâmetro enquanto que o segundo somente ciclones de 4 polegadas. A Tabela 3 mostra o sumário das condições de operação dos ensaios realizados na fase de consolidação.

**Tabela 3.** Ensaio da fase de consolidação.

Ensaio	Dimensões do Ciclone e Pressão de Operação							
	Primeiro Estágio				Segundo Estágio			
	Diâmetro do Ciclone (pol)	Vortex (mm)	Apex (mm)	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Diâmetro (pol)	Vortex (mm)	Apex (mm)	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )
1.1	6	58	19	4,3	4	38	9	4,4
1.2	6	58	19	4,3	4	38	9	4,4
2.1	4	38	12	3,5	4	38	10	3,5
2.2	4	38	12	3,5	4	38	10	3,5
3.1	4	38	12	4,0	4	38	10	4,0
3.2	4	38	12	4,0	4	38	10	4,0
4.1	6	58	19	3,8	4	38	9	3,9
4.2	6	58	19	3,8	4	38	9	3,9

## 3 RESULTADOS

Os resultados experimentais obtidos a partir das amostras coletadas nos ensaios de classificação, utilizados nos balanços de massa e metalúrgico, foram: percentagem de sólidos, distribuições granulométricas, vazões de polpa e teores obtidos na análise química. Os resultados dos balanços de massa, por sua vez, foram empregados nos cálculos para obtenção de índices de desempenho. Os

índices de desempenho avaliados foram as partições globais de sólidos e da fração passante em 0,020 mm, bem como teores e partições de AA e SR no *underflow* de cada ensaio.

### 3.1 Fase Exploratória

Os índices de desempenho obtidos para os ensaios da fase exploratória seguem listados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Índices de desempenho dos ensaios da fase exploratória.

Ensaio	% Sólidos U/F	Partição (%)		Alumina Aproveitável no U/F (%)		Sílica Reativa no U/F (%)	
		Sólidos Total	< 0,020 mm	Teor	Partição	Teor	Partição
1	14,7	29,7	85,2	19,27	45,8	18,42	22,1
2	14,1	26,2	84,6	17,05	41,5	20,17	19,8
3	19,2	18,6	85,1	25,58	35,7	15,19	13,0
4	5,7	7,3	32,6	21,23	16,2	16,69	4,6
5	19,3	15,6	91,8	24,72	10,2	13,12	8,3
6	23,8	17,1	93,1	26,16	42,2	13,92	10,1
7	15,4	23,7	91,2	22,19	40,4	17,18	21,0
8	16,9	27,1	96,4	23,62	47,5	13,85	16,0
9	18,9	19,9	91,1	22,69	41,9	19,52	15,2
10	24,5	26,7	95,2	29,10	59,5	13,18	15,5
11	21,6	28,5	96,5	26,74	56,8	12,60	16,7
12	9,5	26,0	71,9	12,68	33,8	26,34	64,4
13	16,2	11,0	75,1	21,18	9,0	9,39	4,9
14	10,2	35,3	91,6	16,45	60,0	17,88	18,2
15	13,3	19,9	79,9	17,34	19,3	18,02	55,2
16	10,1	22,6	91,6	15,96	39,0	22,79	55,9
17	19,1	10,9	72,6	18,99	8,5	15,72	7,1
18	10,2	28,8	53,1	15,22	43,9	19,38	53,4
19	12,8	28,2	91,3	17,85	23,2	13,19	15,7
20	8,6	38,4	56,7	17,55	41,2	13,72	51,6
21	8,7	24,1	87,7	21,91	22,0	26,99	23,1
22	10,4	35,4	83,0	17,06	48,3	16,18	49,1
23	8,9	28,7	66,3	21,59	25,2	16,74	20,5
24	10,0	21,3	33,5	17,04	31,4	15,61	31,3
25	9,8	25,3	68,9	18,43	18,4	19,54	21,7

A porcentagem de sólidos no *underflow* variou de 5,7% a 24,5%. Já a partição de sólidos esteve na faixa compreendida entre 7,3% e 35,4%, enquanto que a partição da fração passante em 0,020 mm variou de 33,5% a 96,5%. Em 10 dos 25 ensaios realizados a partição da fração passante em 0,020 mm foi igual ou superior a 90%, enquanto que em apenas três ensaios a partição total de sólidos foi superior a 30%, já que a maioria dos valores situou-se na faixa entre 20% e 30%. Nota-se que embora as recuperações da fração de interesse fossem relativamente altas, as recuperações mássicas totais foram também relativamente altas, resultando assim em concentrações relativamente baixas da fração granulométrica objetivo no fluxo de *underflow*. Esse aspecto é melhor analisado mediante a verificação dos teores de alumina aproveitável e sílica reativa no mesmo *underflow*.

Embora as partições de AA variassem de 8,5% a 60%, os teores deste composto oscilaram na faixa de 15,2% a 29,1%, estes últimos bastante mais baixos do que os 45% estipulados como mínimo para o produto. De forma análoga, a recuperação de SR situou-se 4,6% a 64,4%, com teores variando de 9,4% a 27,0% bastante superiores ao valor de 4,5%, estipulado como máximo para este composto

no produto final. Nota-se que valores relativamente altos de teor de AA são acompanhados, via de regra, por teores mais baixos de SR. Contudo ficou evidente a impossibilidade de se obter teores desejados de AA e de SR no *underflow* dos ciclones.

Após serem submetidos a rotinas de balanços de massas os ensaios foram hierarquizados por ordem de consistência, aqui considerada como a diferença entre os valores calculados e os correspondentes experimentais, relativos a granulometrias dos três fluxos, além de porcentagens de sólidos e vazões. Os ensaios assim selecionados foram os seguintes: 3, 5, 6, 8, 10, 11, 13, 14, 16 e 17, ou seja 10 entre os 25 realizados na fase exploratória. Os ensaios considerados mais consistentes foram base para a seleção das configurações de ciclones nos ensaios de classificação em dois estágios.

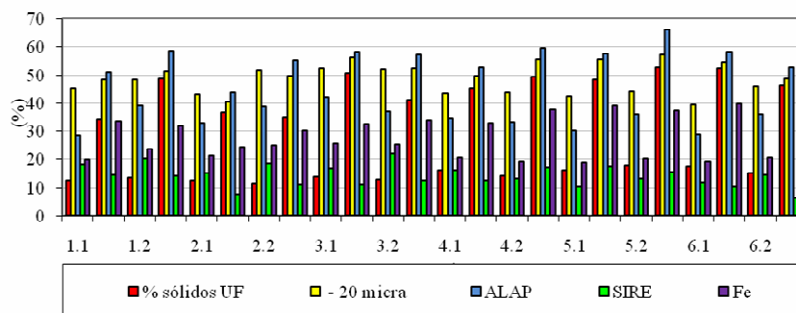
### 3.2 Fase de Otimização

Os trabalhos da fase de otimização foram divididos em dois grupos. O primeiro consistiu em bateria de ensaios com ciclones de 4 polegadas de diâmetro no primeiro estágio e ciclones de 2 polegadas de diâmetro no segundo estágio, denominados 4 x 2. O segundo consistiu em bateria de ensaios com ciclones de 2 polegadas de diâmetro tanto no primeiro como no segundo estágio, denominados 2 x 2. Os índices de desempenho obtidos para cada ensaio são apresentados na Tabela 5. Na Figura 2 foi construído um gráfico com os resultados obtidos.

**Tabela 5.** Índices de desempenho dos ensaios da fase de otimização.

Ensaio	Estágio	% Sólidos U/F	Partição (%)			Alumina Aproveitável no U/F (%)		Sílica Reativa no U/F (%)	
			Sólidos		< 0,020 mm	Teor	Partição	Teor	Partição
			por Estágio	Global					
1.1	Primeiro	12,2	18,3	5,5	45,0	20,0	28,3	18,5	18,0
	Segundo	34,0	30,1		48,1	33,3	51,0	7,3	14,2
1.2	Primeiro	13,3	22,9	7,8	48,0	22,2	38,8	16,5	20,3
	Segundo	48,5	34,2		51,2	40,1	58,5	5,1	13,9
2.1	Primeiro	12,3	19,8	4,6	43,1	17,4	32,8	19,1	15,0
	Segundo	36,4	23,3		3,0	36,1	43,8	5,7	7,6
2.2	Primeiro	11,4	24,4	7,5	15,2	21,3	38,7	15,2	18,6
	Segundo	34,7	30,8		7,1	38,7	55,0	5,8	11,1
3.1	Primeiro	13,5	25,2	9,3	14,3	25,7	42,1	11,7	16,8
	Segundo	50,7	37,0		11,1	42,3	58,1	3,4	10,8
3.2	Primeiro	12,6	23,8	7,9	13,3	21,3	37,0	18,1	21,8
	Segundo	41,1	33,0		8,0	37,1	57,0	5,8	12,2
4.1	Primeiro	16,0	18,2	5,8	43,5	22,3	34,6	16,0	15,9
	Segundo	45,2	31,7		49,4	37,2	52,6	5,7	12,4
4.2	Primeiro	13,9	17,8	6,7	43,6	25,1	33,1	15,1	12,9
	Segundo	49,3	37,9		55,2	39,3	59,4	6,4	17,0
5.1	Primeiro	16,1	17,1	6,6	42,2	25,6	30,1	13,3	10,3
	Segundo	48,0	38,6		55,3	37,7	57,5	5,7	17,6
5.2	Primeiro	17,7	19,8	8,3	44,1	27,4	35,8	11,3	13,1
	Segundo	52,6	41,9		56,9	42,9	65,8	4,7	15,5
6.1	Primeiro	17,3	16,8	6,2	39,1	23,5	28,7	15,6	11,5
	Segundo	52,4	36,7		54,4	38,7	57,9	3,9	10,3
6.2	Primeiro	15,1	18,9	5,3	45,8	26,0	35,7	12,3	14,2
	Segundo	46,0	28,3		48,7	43,2	52,6	3,2	6,0

## Avaliação dos ensaios de otimização



**Figura 2.** Sumário de resultados - Fase de otimização.

Para a combinação 4 x 2 foi observada uma pequena variação na porcentagem de sólidos no *underflow* no primeiro estágio, com mínimo de 11,4% e máximo de 13,5%. No segundo estágio a variação foi mais ampla, de 34,0% a 50,7%. Já a partição de sólidos esteve na faixa compreendida entre 18,3% e 25,2% no primeiro estágio e entre 23,3% e 37% no segundo estágio. A partição global de sólidos variou de 4,6% a 9,3%. A partição da fração passante em 0,020 mm apresentou grandes variações, quer no primeiro como no segundo estágio. O ensaio 1.1 e sua duplicata 1.2 mostraram partições da fração passante em 0,020 mm superiores a 45% em ambos os estágios. Já nos três últimos ensaios, tais partições foram inferiores a 15,2% em todos os estágios.

Os teores de AA no *underflow* foram superiores a 20% em todos os ensaios realizados no primeiro estágio, com máximo no ensaio 5.2, que apresentou ainda menor teor de SR no *underflow* do segundo estágio. Neste mesmo estágio os teores de SR situaram-se entre 15% e 20%, com exceção do ensaio 3.1. Nos ensaios 1.2 e 3.1 o teor de AA no *underflow* do segundo estágio foi igual ou superior a 40%, ensaios estes que registraram os menores teores de sílica reativa.

Para a combinação 2 x 2 foi observada uma variação na porcentagem de sólidos no *underflow* no primeiro estágio, com mínimo de 13,9% e máximo de 17,7%. No segundo estágio a variação foi mais ampla, de 45,2% a 52,6%. Já a partição de sólidos esteve na faixa compreendida entre 16,8% e 19,8% no primeiro estágio e entre 28,3% e 41,9% no segundo estágio. A partição global de sólidos variou de 5,3% a 8,3%. A partição da fração passante em 0,020 mm apresentou variações relativamente baixas, quer no primeiro como no segundo estágio. O ensaio 6.2 apresentou o maior valor no primeiro estágio, enquanto que o ensaio 5.1 indicou a maior recuperação no segundo estágio.

No segundo estágio o ensaio 5.2 apresentou máximos de recuperações de sólidos e da fração passante em 0,020 mm, cuja combinação com o primeiro estágio resultaram em maior recuperação global de massa.

Com base nos resultados obtidos decidiu-se avançar para uma fase de consolidação visando empregar ciclones de 6 polegadas. Os ensaios da fase de consolidação foram selecionados com base nos resultados dos ensaios com maior consistência nos balanços de massas e metalúrgico: 1.2, 2.2, 3.2, 4.1, 5.1, 5.2 e 6.2.

### 3.3 Fase de Consolidação

Os trabalhos da fase de consolidação foram também divididos em dois grupos. O primeiro consistiu em bateria de ensaios com ciclones de 6" de diâmetro



no primeiro estágio e ciclones de 4" de diâmetro no segundo estágio, denominados 6x4. O segundo consistiu em bateria de ensaios com ciclones de 4" de diâmetro tanto no primeiro como no segundo estágio, denominados 4 x 4.

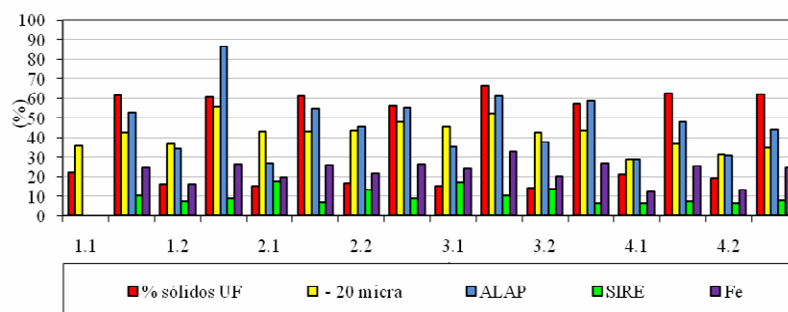
No grupo de ensaios 6 x 4 todos os ensaios foram conduzidos com as mesmas aberturas de *vortex* e *apex* (*vortex* com diâmetro de 58 mm e *apex* com diâmetro de 19 mm), porém com diferentes combinações de pressão de operação desde a mais alta, respectivamente 4,3 kgf/cm<sup>2</sup> e 4,4 kgf/cm<sup>2</sup> no primeiro e segundo estágio, até pressões mais baixas, onde, analogamente as pressões foram de 3,8 kgf/cm<sup>2</sup> e 3,9 kgf/cm<sup>2</sup>. O segundo grupo de ensaios 4 x 4 também foi conduzido com as mesmas aberturas de *vortex* e *apex* (*vortex* com diâmetro de 38 mm e *apex* com diâmetro de 12 mm). Na dupla de ensaios 2.1/2.2 a pressão foi relativamente mais baixa, igual a 3,5 kgf/cm<sup>2</sup> tanto no primeiro como no segundo estágio, em relação à dupla de ensaios 3.1/3.2, onde, analogamente as pressões foram de 4,0 kgf/cm<sup>2</sup>.

A Tabela 6 mostra os índices de desempenho obtidos para os ensaios da fase de consolidação e a Figura 3 apresenta um gráfico contendo um sumário dos resultados obtidos.

**Tabela 6.** Índices de desempenho dos ensaios da fase de consolidação.

Ensaio	Estágio	% Sólidos U/F	Partição (%)		< 0,020 mm	Alumina Aproveitável no U/F (%)		Sílica Reativa no U/F (%)	
			Sólidos			Teor	Partição	Teor	Partição
			por Estágio	Global					
1.1	Primeiro	22,1	14,8	5,1	35,9	-	-	-	-
	Segundo	61,5	34,3		42,6	47,9	52,7	3,3	10,2
1.2	Primeiro	16,3	15,1	6,5	36,6	30,7	34,4	11,4	7,2
	Segundo	60,3	43,2		55,5	46,9	86,4	3,2	9,0
2.1	Primeiro	15,0	19,7	6,3	42,8	17,3	26,8	18,8	17,8
	Segundo	61,0	31,9		42,8	46,4	54,4	2,6	6,7
2.2	Primeiro	16,8	22,6	7,9	43,5	30,4	45,6	10,6	13,2
	Segundo	55,9	35,0		47,9	47,3	55,3	2,8	8,6
3.1	Primeiro	15,1	22,2	8,8	45,5	22,9	35,2	18,9	17,0
	Segundo	66,5	39,6		52,0	47,0	61,1	3,4	10,2
3.2	Primeiro	13,9	18,3	5,5	42,5	24,3	37,4	15,7	13,6
	Segundo	57,3	30,1		43,5	46,0	58,7	3,6	6,5
4.1	Primeiro	20,9	11,1	3,2	28,7	33,6	29,0	14,7	6,2
	Segundo	62,6	28,8		36,7	43,8	48,0	3,9	7,4
4.2	Primeiro	19,2	12,4	3,4	31,2	28,7	30,9	12,7	6,4
	Segundo	61,9	27,6		34,9	45,3	43,9	3,6	8,0

Avaliação dos ensaios de otimização



**Figura 3.** Sumário de resultados - Primeiro e Segundo Grupos - Fase de consolidação.

Houve variação relativamente alta na porcentagem de sólidos no *underflow* no primeiro estágio dos ensaios 1.1 e 1.2, com mínimo de 16,3% e máximo de 22,1%. No segundo estágio destes mesmos ensaios a variação foi menor, de 60,3% a 61,5%. Já a partição de sólidos esteve na faixa compreendida entre 14,8% e 15,1% no primeiro estágio e entre 34,3% e 43,2% no segundo estágio. A partição global de sólidos variou de 5,1% a 6,5%. Nos ensaios 4.1 e 4.2 as partições globais de sólidos apresentaram valores de 3,2% e 3,4%, respectivamente nos dois ensaios.

Embora a variação na porcentagem de sólidos no *underflow* no primeiro estágio dos ensaios 2.1 e 2.2, não fosse muito alta, com mínimo de 15,0% e máximo de 16,8%, no segundo estágio destes mesmos ensaios a variação foi significativamente maior, de 55,9% a 61,0%. Já a partição de sólidos esteve na faixa compreendida entre 19,7% e 22,6% no primeiro estágio e entre 31,9% e 35,0% no segundo estágio. A partição global de sólidos variou de 6,3% a 7,9%. Nos ensaios 3.1 e 3.2 as variações nas porcentagens de sólidos no *underflow* foram também relativamente baixas nos primeiros estágios e mais altas nos segundos estágios. As partições globais de sólidos apresentaram valores de 8,8% e 5,5%, respectivamente nos dois ensaios.

Assim, as pressões mais altas resultaram em valores maiores nas partições globais e na fração passante em 0,020 mm, tanto nos primeiros como nos segundos estágios, e as pressões mais baixas resultaram em valores intermediários nas partições globais e na fração passante em 0,020 mm.

Todos os teores de AA no *underflow* do segundo estágio foram superiores a 45% em todos os quatro ensaios. Em todos os ensaios os teores de sílica reativa no *underflow* do segundo estágio situaram-se abaixo de 5%, com valores menores na dupla de ensaios 2.1 e 2.2.

## **5 CONCLUSÃO**

Da primeira fase, denominada exploratória, conclui-se que a classificação em um único estágio não seria suficiente para atingir os enriquecimentos estipulados em AA, bem como as reduções no teor de SR do produto. Os resultados obtidos foram empregados na definição da configuração de ciclones da segunda fase, denominada de fase de otimização.

A campanha de otimização resultou em recuperações em massa relativamente mais altas (até 9,3%), porém com teores mínimos de SR de 3,4% e máximos de AA de 43%, estes últimos considerados ainda baixos pela MRN para composição do produto final. Os resultados desta fase foram empregados para programar a última fase de ensaios, denominada de consolidação.

Além do enriquecimento, a fase de consolidação visou analisar a possibilidade de se utilizar ciclones maiores em ambos os estágios, de forma a diminuir as instalações físicas da futura usina industrial do projeto.

Os resultados da campanha de consolidação mostraram o melhor desempenho da combinação de ciclones de 4 polegadas de diâmetro tanto no primeiro como no segundo estágio, operando sob pressões relativamente altas. Dessa forma foram obtidas separações em tamanhos praticamente coincidentes aos estipulados e, sobretudo, com excelente nitidez em ambos os estágios.

As três campanhas de ensaios de classificação em ciclones do atual rejeito da usina industrial da MRN resultaram em uma base de dados sólida e consistente para análise de desempenho e calibração de modelos matemáticos que representem a

operação e permitam a análise de seu desempenho. Como os ensaios foram realizados com equipamentos de porte industrial, não haverá necessidade de etapa de escalonamento no projeto, de forma a dimensionar a futura usina industrial.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao técnico Robson de Jesus Melo Machado e ao engenheiro Eric Tadashi Abe, pela ajuda de ambos na coordenação e execução das amostragens no circuito industrial e dos ensaios na planta piloto.

Agradecimentos também à MRN pelo apoio ao projeto e por permitir a publicação dos dados obtidos.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 DELBONI JUNIOR, H.; FOGGIATTO, B. *Aproveitamento de ultrafinos dos rejeitos da usina industrial da MRN*. Porto Trombetas, PA: MRN, 2007. [Relatório interno].
- 2 JULIUS KRUTTSCHNITT MINERAL RESEARCH CENTER. Mass Balancing. In: JULIUS KRUTTSCHNITT MINERAL RESEARCH CENTER. *The JKSimMet steady state mineral processing simulator: full manual*. Version 5.1. Indooroopilly, Queensland, 2003. cap. 6, p. 1-36
- 3 NAPIER-MUNN, T. J. *Mineral comminution circuits: their operation and optimisation*. Indooroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996.
- 4 GY, P.M. The sampling of particulate materials: a general theory. In: SYMPOSIUM ON SAMPLING PRACTICES IN THE MINERALS INDUSTRY, 1976, Melbourne. *Proceedings...* Parkville: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1976. p. 17-34.