

FLOTAÇÃO DO REJEITO DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA DE UM MINÉRIO DE FERRO EUROPEU ⁽¹⁾.

Armando Corrêa de Araújo ⁽²⁾
Paulo Roberto de Magalhães Viana ⁽²⁾
Sabrina Aparecida Alves França ⁽³⁾
Antônio Gomes Pereira ⁽³⁾

- ¹ - Trabalho apresentado na 60ª edição Congresso da ABM – Belo Horizonte – Julho de 2005.
² - Professor e Pesquisador do Departamento de Engenharia de Minas - UFMG
³ - Aluno do Departamento de Engenharia de Minas - UFMG.

1. INTRODUÇÃO:

Este trabalho apresenta os resultados finais dos testes realizados com o objetivo de concentração do rejeito da separação magnética de um minério de ferro europeu. Foram realizados testes de separação magnética e flotação em escala de bancada

Os primeiros testes foram realizados com o material moído abaixo de 150 μ m, seguindo-se flotação catiônica reversa dos silicatos e aniônica direta dos minerais de ferro. Devido a fator essencialmente econômico foi desconsiderada a possibilidade de moagem do material e os trabalhos foram direcionados para a fração abaixo de 53 μ m e acima de aproximadamente 10 μ m que, na amostra “in natura” recebida, correspondeu a cerca de 50% em massa da alimentação com teor de ferro entre 38% e 40%. O uso de flotação catiônica reversa, tradicional para minérios de ferro, após concentração magnética em dois estágios, levou a obtenção de concentrado com 60% de ferro e 15% de SiO₂ e recuperação em peso global de 13%. Objetivando-se a diminuição do teor de sílica foram realizados novos testes de flotação usando-se o ácido oxálico como complexante para cálcio e magnésio, a realização da desmagnetização do material com o objetivo de se eliminar a aglomeração magnética do minério e novamente separação magnética. Nesta nova situação foram obtidos concentrados com teores entre 58% e 62% de ferro com teores de sílica entre 6% e 9% porém com índices de recuperação em massa global muito baixa. Após estes testes considera-se que a rota mais adequada é a flotação catiônica reversa com o uso de ácido oxálico. O melhor resultado associado à rota sugerida é mostrado na tabela 1.

Tabela 1. Flotação com Ácido Oxálico.

Dosagem (g/t)			pH	Concentrado				Distribuição		
Ác. Oxálico	Amido	Amina		Fe	SiO ₂	CaO	MgO	Rec. Massa	Fe	SiO ₂
800	500	100	7,5	61,9	6,7	3,19	2,37	10,82	17,3	1,9

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL:

2.1. Testes de separação magnética:

Os testes de separação magnética foram realizados com separador magnético de alta intensidade da Carpcu usando-se um leito de esferas como matriz e porcentagem de sólidos em torno de 15% a 20%. Os testes foram realizados com 100g de alimentação em cada batelada.

2.2. Principais condições dos testes de flotação:

- Classificação anterior à flotação – o material foi peneirado via úmida e a seco (peneiramento combinado) em 53 μ m e a fração passante em 53 μ m foi deslamada via sedimentação em baldes de 50 litros (3 estágios com 20 min de sedimentação em cada estágio).
- Célula de flotação Denver D12, rotação de 1500 rpm e cubas de 0,6 e 1,5 litros em função do tamanho da alíquota usada no teste.
- Massa de alimentação de cerca de 150 a 600 g/teste;

- pH de flotação variável de 6,6 a 11,5 em função das condições de cada teste;
- Concentração de sólidos de 35% em peso
- Reagentes:
 - a) Depressor: Amido de milho convencional gelatinizado com NaOH, solução a 1% p/v;
 - b) Coletor: Sais de aminas primárias, etheraminas e etherdiaminas, soluções a 1% p/v;
 - c) Modificadores de pH – NaOH e HCL, soluções a 1% p/v;
 - d) Modificadores: ácido oxálico, solução a 1% p/v;
 - e) Tempo e condicionamento do depressor = 5 minutos, coletor = 1 minuto, modificador = 5 minutos e tempo total de flotação de 3 minutos.

2.3. Desmagnetização:

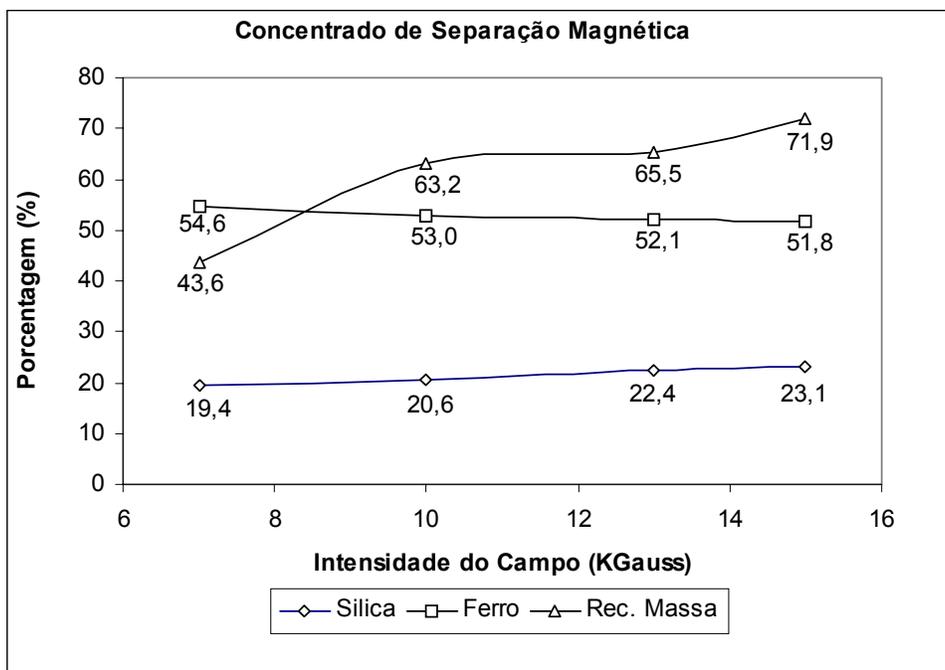
A desmagnetização da amostra natural e dos concentrados magnéticos foi obtida através da diminuição da temperatura do material para valores abaixo de 10°C.

3. RESULTADOS OBTIDOS:

3.1. Separação magnética e Flotação catiônica reversa com amina (-53 + 10 µm):

Os testes de separação magnética foram planejados como uma etapa intermediária de concentração anterior à flotação, em função dos resultados de testes preliminares, mostrados na figura I que indicavam esta possibilidade com um aumento do teor de ferro de 38% para cerca de 54%.

Figura I. Testes preliminares de separação Magnética.



Os resultados dos testes de separação magnética e flotação são mostrados na figura II. Em todos os testes de flotação desta etapa a dosagem de coletor/depressor foi mantida constante em 75g/t e 500g/t e o pH da flotação foi 9,5. A principal característica desta

flotação foi a coleta de praticamente de toda a mica presente no minério, sendo que o aumento da dosagem de coletor de forma direta ou através de estagiamento da adição do coletor não levou a redução posterior do teor de sílica no concentrado.

Os testes foram realizados em quatro seqüências diferentes:

- A) 2 Separações Magnéticas (7/10 KGauss) / Flotação / Separação Magnética (13 kGauss).
- B) 2 Separações Magnéticas (10/7 KGauss) / Flotação / Separação Magnética (13 KGauss)
- C) 3 Separações Magnéticas (7/10/10 KGauss) / Flotação
- D) 3 Separações Magnéticas (10/10/7 KGauss) / Flotação

Os resultados dos testes A e B, tanto com relação à recuperação em massa quanto às distribuições de ferro e sílica, mostram que não há diferença significativa ao se alterar a ordem de intensidade magnética nos dois estágios de separação magnética. Por outro lado fica claro que após os dois estágios de separação magnética (7 e 10 KGauss), seguidos de flotação, não há vantagem em se tentar limpar o concentrado da flotação via um terceiro passo de separação magnética uma vez que não ocorre mais elevação dos teores de ferro de forma significativa e somente são acrescidas perdas em massa. Os testes C e D, três estágios de separação magnética prévios à flotação, confirmam as observações anteriores uma vez que mesmo diminuindo-se a intensidade de campo no terceiro estágio de separação magnética não há aumento do teor de ferro. Na verdade, no terceiro estágio de separação magnética dos dois testes (C e D) houve uma diminuição do teor de ferro e aumento do teor de sílica indicando uma perda de ferro, provavelmente mais fino e externo aos aglomerados magnéticos com a sílica ficando, no entanto presa nestes mesmos aglomerados. Comparativamente aos testes A e B a perda em massa e ferro no resultado global dos testes C e D foi de 2,5% e 4% respectivamente.

Figura II. Resultados da Flotação e da Separação Magnética (testes A, B, C e D).

Teste	Sep. Magnética	Alimentação		Concentrado		Rejeito		Massa (g)			Distribuição (%)				
		Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	Alim.	Conc.	Rejeito	Massa	Fe	SiO ₂		
A	7 KGauss	37,9	40,9	54,4	20,7	27,0	54,3	2791,1	1110,2	1680,9	39,8	57,1	20,1		
	10 KGauss	54,7	20,7	56,5	18,7	49,8	26,1	293,9	214,2	79,7	72,9	75,3	65,9		
										Produto	29,0	43,0	13,3		
A	Flotação	56,5	18,2	58,8	15,3	41,4	37,0	145,8	126,9	19,0	87,0	90,0	73,5		
												Produto	25,2	38,9	9,7
A	Sep. Magnética 13 KGauss	58,8	15,3	58,9	15,9	57,6	8,5	74,6	69,3	5,3	92,9	93,0	96,0		
												Produto	23,4	36,2	9,4
										Distribuição Total		Total	11,7	18,1	4,7
Teste	Sep. Magnética	Alimentação		Concentrado		Rejeito		Massa (g)			Distribuição (%)				
		Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	Alim.	Conc.	Rejeito	Massa	Fe	SiO ₂		
B	10 KGauss	37,9	41,4	54,4	20,6	23,2	60,0	2829,4	1332,0	1497,4	47,1	67,6	23,4		
	7 KGauss	53,9	20,6	55,9	8,2	49,5	25,8	295,5	202,5	93,0	68,5	71,6	60,6		
										Produto	32,3	48,1	14,2		
B	Flotação	56,4	18,4	59,3	14,7	44,7	33,3	142,7	114,0	28,7	79,9	84,0	63,6		
												Produto	25,8	40,4	9,0
B	Sep. Magnética 13 KGauss	59,3	14,7	59,5	13,9	56,6	24,2	71,5	66,1	5,3	92,5	92,9	87,7		
												Produto	23,8	37,5	7,9
										Distribuição Total		Total	11,9	18,8	4,0
Teste	Sep. Magnética	Alimentação		Concentrado		Rejeito		Massa (g)			Distribuição (%)				
		Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	Alim.	Conc.	Rejeito	Massa	Fe	SiO ₂		
C	7 KGauss	37,9	40,9	54,4	20,7	27,0	54,3	2791,1	1110,2	1680,0	39,8	57,1	20,1		
	10 KGauss	54,7	20,8	56,5	18,8	50,6	25,3	385,4	266,6	118,9	69,2	71,5	62,5		
	10 KGauss	56,0	19,1	55,3	20,2	58,5	15,4	227,9	178,9	48,9	78,2	77,6	82,7		
										Produto	21,6	31,7	10,4		
C	Flotação	57,5	17,8	60,4	14,0	40,9	39,6	143,2	121,7	21,5	85,0	89,3	66,6		
												Produto	18,4	28,3	6,9
										Distribuição Total		Total	9,2	14,1	3,5
Teste	Sep. Magnética	Alimentação		Concentrado		Rejeito		Massa (g)			Distribuição (%)				
		Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	Alim.	Conc.	Rejeito	Massa	Fe	SiO ₂		
D	10 KGauss	37,9	41,4	54,4	20,6	23,2	60,0	2829,4	1332,0	1497,4	47,1	67,6	23,4		
	10 KGauss	54,4	20,8	57,1	17,9	49,0	26,6	478,1	319,0	159,1	66,7	70,0	57,4		
	7 KGauss	57,0	17,4	56,6	18,4	58,1	15,2	278,5	193,5	85,0	69,5	68,9	73,3		
										Produto	21,8	32,6	9,8		
D	Flotação	56,6	18,6	59,1	15,3	43,6	36,0	148,5	124,7	23,8	84,0	87,7	69,0		
												Produto	18,3	28,6	6,8
										Distribuição Total		Total	9,2	14,3	3,4

Constatou-se adicionalmente que a separação magnética em dois estágios possibilitou a redução dos teores de fósforo de um valor em torno de 0,069% na alimentação para cerca de 0,025% de fósforo no produto magnético. Na flotação há um incremento de 20% levando a um concentrado final com 0,030% de fósforo. Os teores de CaO e MgO também são reduzidos durante a separação magnética. Na flotação ocorre um incremento no teor de CaO enquanto que o teor de MgO é reduzido.

3.2. Testes de flotação com ácido oxálico e/ou material desmagnetizado:

Objetivando-se a redução dos teores de sílica no concentrado foram realizados testes de flotação com ácido oxálico, testes de flotação após desmagnetização do material da alimentação (-53 + 10 µm) e dos concentrados obtidos na separação magnética e testes combinados (ácido oxálico + desmagnetização).

3.2.1. Testes de flotação com a fração -53+10 µm (alimentação desmagnetizada):

A desmagnetização do material foi realizada submetendo o mesmo a temperaturas menores que 10°C através do uso de nitrogênio líquido.

Verifica-se que somente a desmagnetização do material da fração -53 + 10 µm não é eficiente para a obtenção de teores de sílica menores que 10% e o melhor resultado obtido foi de 14,5% de sílica para 100g/t de amina e 500g/t de amido na flotação. Nos testes realizados a partir de concentrados da separação magnética onde o teor de sílica inicial já é relativamente baixo, cerca de 18% na alimentação da flotação, o concentrado da flotação apresentou teor de 15% de sílica para 75g/t de amina e 500g/t de amido. A desmagnetização do material portanto não produziu os resultados esperados e os testes de flotação com o material natural (-53 + 10 µm), testes de flotação com ácido oxálico e com concentrados magnéticos, sem a desmagnetização, mostraram valores de sílica equivalentes ou menores que os obtidos nos testes com desmagnetização.

3.2.2. Testes de flotação com ácido oxálico:

Os resultados dos testes de flotação do material natural com ácido oxálico, fração -53 + 10 µm e porcentagem de ferro entre 38 e 40%, são mostradas nas figuras III e IV .

Pode ser visto que, como regra geral, à medida que se aumenta a dosagem de ácido oxálico ocorre um aumento no teor de ferro e abaixamento do teor de sílica no concentrado ao mesmo tempo em que há um decréscimo nos índices de recuperação em massa e ferro. Na dosagem de 800g/t de ácido oxálico, figura III ocorre um valor mínimo para o teor de sílica e máximo para o teor de ferro e em seguida, na dosagem de 1200g/t, existe uma grande elevação do teor de sílica assim como dos índices de recuperação que voltam a baixar em dosagens maiores de ácido oxálico. Ao se inverter a ordem de adição dos reagentes, condicionamento da polpa com amido anterior à adição de ácido oxálico, figura IV, ocorre um aumento significativo no teor de sílica para 800g/t e diminuição do teor de sílica para 1200g/t de ácido oxálico. Os índices de recuperação para ambas as dosagens destacadas sofrem um grande abaixamento, porém a forma geral da curva com um mínimo em 800g/t e um máximo em 1200g/t é mantida, *indicando que a dosagem mais adequada de ácido oxálico, dentre as testadas, é realmente 800g/t*, correspondendo a um teor de sílica no concentrado de 6,7%. Este mesmo teor de sílica, 6,7%, foi alcançado em outro teste, porém com dosagem muito mais elevada de ácido oxálico, 2000g/t, e com menos da metade da recuperação de ferro conseguida com 800g/t.

Figura III. Flotação com ácido Oxálico:

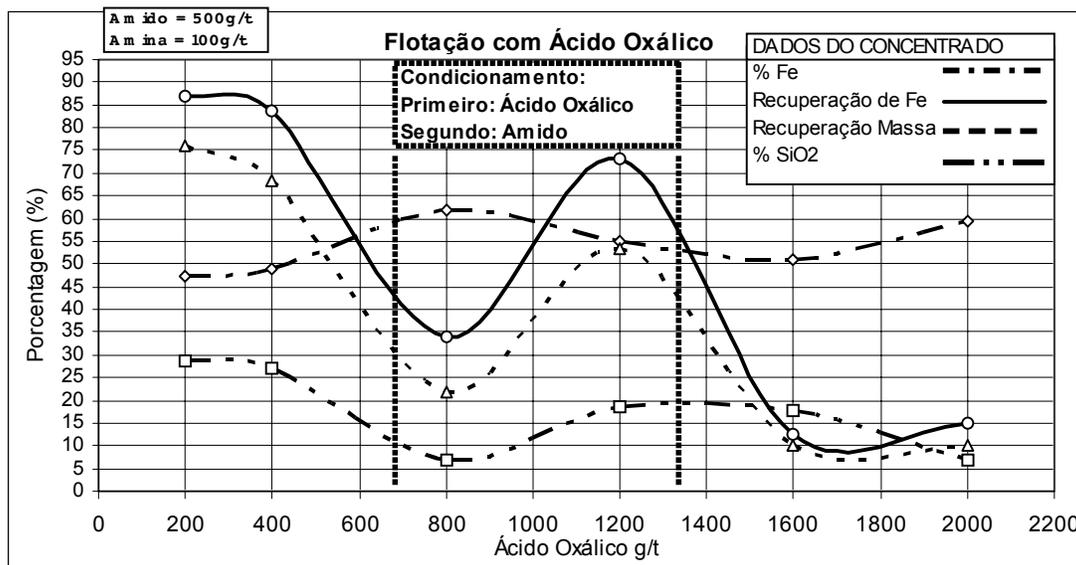
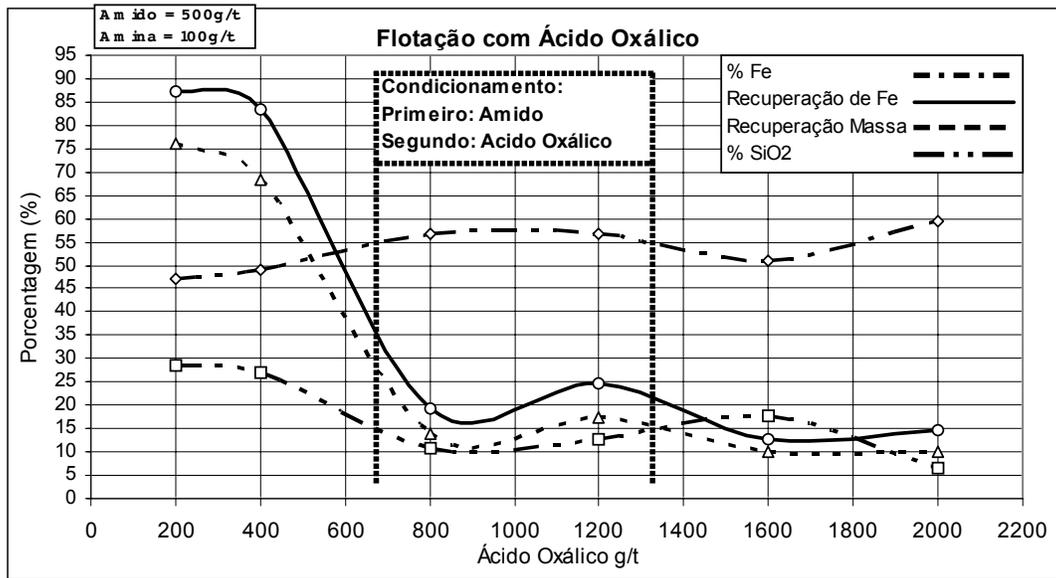


Figura IV. Flotação com ácido Oxálico:



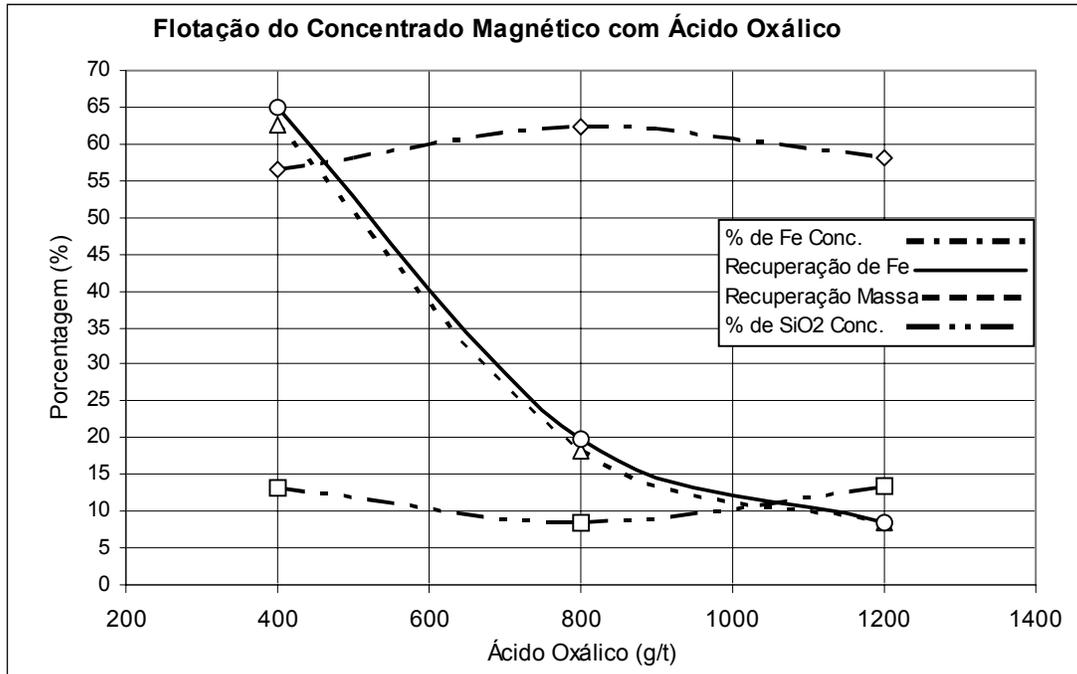
3.2.3. Testes de flotação com concentrado magnético desmagnetizado

Foram realizados testes com e sem ácido oxálico com dosagens fixas de 500g/t de amido e 75g/t de amina. O resultado do teste sem ácido oxálico mostrou teores de sílica e ferro e índices de recuperação equivalentes aos obtidos com os testes de flotação com concentrado magnético normal (sem desmagnetização). Com 400g/t de ácido oxálico já se obtém teor de sílica de 7,5%. Comparativamente com os testes realizados com o concentrado magnético natural, verifica-se que, para a mesma dosagem de 400g/t, obtém-se teor de sílica muito menor para o concentrado desmagnetizado, porém com índices de recuperação também menores enquanto que em de 800g/t pode-se considerar os resultados como sendo equivalentes em teores e índices de recuperação. Como foram obtidos resultados satisfatórios somente com a flotação do material natural com o ácido oxálico, esta rota, em princípio é adequada.

3.2.4. Testes de flotação do concentrado magnético com ácido oxálico:

Os resultados são mostrados na figura V. Novamente verifica-se que o melhor resultado é alcançado com a dosagem de 800g/t de ácido oxálico com um teor de sílica no concentrado da flotação de 8,4%. No entanto estes testes demonstram que a recuperação em massa global seria muito baixa. A fração -53 +10 µm corresponde a cerca de 50% da massa da alimentação inicial e a recuperação em massa média na separação magnética se situa em torno de 30%. Assim a recuperação em massa global para o melhor resultado obtido com 600g/t de ácido oxálico seria: $0,5 \times 0,3 \times 18,2 = 2,7\%$.

Figura V. Testes de Flotação com Acido Oxálico e Concentrado Magnético.



3.3. Testes de separação magnética dos concentrados dos testes de flotação:

Os testes foram realizados em dois estágios; rougher e cleaner. De acordo com os dados das tabelas 2 e 3, pode-se constatar que nenhum dos testes realizados gerou resultados adequados. Considerou-se como 'resultado adequado' a ocorrência simultânea de teor de sílica menor que 8% e recuperação em massa global maior que 8%. Os testes que levaram a baixos teores de sílica no concentrado final caracterizaram-se por valores de recuperação global muito baixos. Por outro lado os testes com índices de recuperação adequados apresentaram teores de sílica acima de 8%. Assim a flotação seguida de separação magnética, apesar de ter alcançado teores de sílica no concentrado da ordem de 10% para índices de recuperação acima de 8% em alguns testes, não seria uma rota competitiva, devido ao fato que estes testes estão associados à adição de ácido oxálico ou desmagnetização do material e, como apresentado anteriormente, somente a flotação com ácido oxálico já é suficiente para atender os critérios de teor de sílica e recuperação em massa.

Tabela 2: Separação Magnética dos concentrados da Flotação - Rougher.

Variáveis de Flotação				Resultados										Recuperação Mássica Acumulada
Produto	Dosagem (g/t)			Teste	Alimentação		Concentrado		Rejeito		Distribuição (%)			
	Oxálico	Amido	Amina		Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	Massac	Fe	SiO ₂	
Natural	200	500	100	1	46,3	30,7	58,1	16,2	29,1	51,7	59,3	74,4	26,3	22,5
Natural	400	500	100	2	47,2	25,9	54,7	15,2	30,0	50,3	69,5	80,6	43,6	23,8
Natural	1200	500	100	3	56,6	13,9	59,0	11,5	39,3	31,7	88,1	91,7	70,1	7,6
Natural	1200	500	100	4	54,6	18,9	60,8	11,9	35,9	40,1	75,1	83,7	46,0	20,0
Natural	2000	500	100	5	59,6	7,7	60,9	6,7	48,2	16,3	89,4	91,5	74,0	4,5
Demagnetized	-	500	100	6	57,4	14,5	62,7	9,2	51,0	21,1	55,1	60,1	34,9	10,9
Demagnetized	-	500	75	7	46,4	30,3	58,5	15,7	29,2	51,1	58,7	74,0	31,1	20,2
Demagnetized	-	700	100	8	47,0	29,9	57,7	16,8	27,3	53,9	64,7	79,5	36,5	22,5

Tabela 3: Separação Magnética dos concentrados da Flotação - Cleaner.

Variáveis de Flotação				Resultados										Recuperação Mássica Acumulada
Produto	Dosagem (g/t)			Teste	Alimentação		Concentrado		Rejeito		Distribuição (%)			
	Oxálico	Amido	Amina		Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	Massac	Fe	SiO ₂	
Natural	200	500	100	1	58,1	16,2	59,6	14,7	54,8	19,5	68,3	68,3	79,3	15,4
Natural	400	500	100	2	54,7	15,2	55,5	13,4	52,3	21,0	76,3	74,0	59,9	18,2
Natural	1200	500	100	3	59,0	11,5	61,1	10,3	52,6	15,5	75,9	78,3	77,4	5,8
Natural	1200	500	100	4	60,8	11,9	62,4	10,4	56,3	16,2	74,0	75,2	68,1	14,8
Natural	2000	500	100	5	60,9	6,7	62,9	6,1	57,5	7,8	63,5	65,9	69,3	2,9
Desmagnetizado	-	500	75	6	58,5	15,7	59,5	15,0	56,4	17,1	66,2	67,2	61,0	13,3
Desmagnetizado	-	700	100	7	57,7	16,8	59,1	15,5	53,6	20,6	74,3	76,1	68,3	16,7

4. CONCLUSÕES:

- A concentração por separação magnética da fração -53 + 10 µm do minério seguido por flotação catiônica reversa convencional não foi capaz de produzir, de forma isolada, concentrados com teores de sílica dentro das especificações requeridas.
- A concentração exclusivamente por flotação, da fração -53 + 10 µm, após desmagnetização, não foi capaz de produzir concentrados com teores de sílica adequados equivalendo ao resultado da flotação com o material natural.
- A operação de flotação, isoladamente, com uso de 800g/t de ácido oxálico produziu concentrado com teor de sílica de 6,7%, e recuperação em massa global de 10,8%, sendo esta, portanto a rota de processo mais adequada.

- O fluxograma da figura VI mostra a rota de processo selecionada.

Figura VI. Fluxograma

