



CONCENTRAÇÃO DE REJEITO DE CIRCUITO DE JIGAGEM DE MINÉRIO DE FERRO POR ESPIRAL DE HUMPHREYS

DAUCE, P.D.¹, ROCHA, G.M.¹, LIMA, M. M. F.², LIMA, R.M.F.¹

¹Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia de Minas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. e-mail: rosa@ufop.edu.br

²Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia Mecânica.

RESUMO

Devido à ineficiência de processos industriais de beneficiamento de minérios, milhões de toneladas de minerais úteis são descartados anualmente como rejeitos, o que gera elevados custos de operação, perdas de produção e grande impacto ambiental na disposição dos mesmos. Por essa razão, estudos visando à minimização de descarte de rejeitos têm ganhado o interesse de pesquisadores e empresas. Neste trabalho são apresentados os resultados de ensaios de concentração em espiral de *Humphreys*, efetuados com um rejeito de minério de ferro (30,35% Fe e 50,36% SiO₂) proveniente da etapa de jigagem de uma mineradora situada na região de Serra Azul, Quadrilátero Ferrífero. Os parâmetros investigados, usando planejamento fatorial de experimentos com réplica foram: percentual de sólidos na polpa (20 e 30%) e distribuição granulométrica da amostra (global e +75 µm). As variáveis respostas analisadas foram: recuperação mássica, recuperação de Fe, teores de Fe e SiO₂ nos concentrados obtidos. O melhor resultado foi obtido para polpa com 20% de sólidos e amostra global. Nestas condições foram obtidas recuperação mássica de 20% e recuperação de Fe de 37,0%. Os teores alcançados (53,2% de Fe e 19,0% de SiO₂) são satisfatórios para uma etapa *rougher* de concentração.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito de minério de ferro, Métodos de concentração, Espiral de *Humphreys*.

ABSTRACT

Due to the inefficiency of industrial ores processing, millions of tons of useful minerals are disposed annually as tailings, which results in high operating costs, production losses and great environmental impact in the disposal of those materials. Studies with the objective to minimize the tailings discharge has been raised the interest of researchers and companies. In this work are presented the results of concentration tests by *Humphreys* spiral carried out with a tailings sample (50.36% Fe and 50.36% SiO₂) from the jiggging stage of a mining company located in the region of Serra Azul, Quadrilátero Ferrífero. The parameters investigated, using factorial planning design of the experiments with replicate were: pulp density (20 and 30%) and size distribution of the sample (global and + 75 µm). The variables responses analyzed were: mass recovery, Fe recovery, Fe and SiO₂ contents in the obtained concentrates. The best result was obtained for 20% pulp density and global sample. In those conditions were obtained 20% mass recovery and 37% Fe recovery. The grades reached in concentrate (53.2% Fe and 19.0% SiO₂) are satisfactory for a rougher concentration step.

KEYWORDS: Iron ore tailing, Concentration methods, *Humphreys* spiral.

1. INTRODUÇÃO

A exaustão das reservas de minérios de ferro de altos teores, o cenário de instabilidade dos preços desta *commodity* mineral observado nos últimos anos e ocorrências de desastres ambientais, causados pelo rompimento de barragens de rejeitos no Brasil, realçam a necessidade de minimização do descarte de rejeitos. O processamento do minério de ferro da região do Complexo Serra Azul (Quadrilátero Ferrífero) gera rejeitos com teor de Fe acima de 30% (Rabelo, 2015), o que é considerado alto, uma vez que diversas minas do Quadrilátero Ferrífero concentram a fração pellet feed de minérios com teores próximos a este valor (31 a 40%) (Lima *et al.*, 2011).

Os métodos de concentração de minérios de ferro aplicados industrialmente são: concentração gravítica (jigues e espirais de *Humphreys*), concentração magnética (baixa e alta intensidade) e flotação. A escolha do método de concentração para um determinado minério depende, dentre outros fatores, das propriedades físicas, químicas, mineralógicas e granulometria de liberação dos minerais-minério em relação aos minerais de ganga (Araújo *et al.*, 2003).

Segundo Arenare *et al.* (2009) a espiral de *Humphreys* tem apresentado sucesso especial no processamento da fração fina da produção de *sinter feed* (-1+0,15 mm). Neste equipamento, a polpa é alimentada na parte superior e ao descer pela calha inclinada, as partículas minerais são submetidas à ação de um fluxo primário direcionado para baixo e um fluxo secundário radial ao fluxo primário, que fazem com que os minerais leves sejam suspensos para a lateral da calha, e os minerais densos sedimentem na parte central. A principal vantagem desse equipamento é o seu baixo custo, por não utilizar reagentes e energia elétrica, mas exige uma operação cuidadosa e controle das características da alimentação para manter a operação constante. As principais variáveis operacionais são: taxa de alimentação, distribuição granulométrica, teor de Fe da alimentação e percentual de sólidos da polpa.

Visando o reaproveitamento de um rejeito grosso proveniente do processo de concentração por jigagem, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação de concentração em espiral de *Humphreys* como alternativa de rota para seu beneficiamento.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Amostra de minério

Uma amostra (~580 kg) proveniente de rejeito de jigagem de minério de ferro de uma mineradora localizada na região de Serra Azul, Quadrilátero Ferrífero-MG. Inicialmente a amostra foi homogeneizada e quarteada em divisores Carrossel e Jones para retirada de uma sub amostra, que posteriormente, foi fragmentada em britador de rolos e moinho de barras a seco até que todas as partículas estivessem abaixo de 1400 μm para serem utilizados nos ensaios de concentração gravítica em espiral de *Humphreys*.

Na Figura 1 está apresentada a distribuição granulométrica da amostra após a etapa de fragmentação, determinada por peneiramento combinado e difração à laser (Cilas 1064) da fração -37 μm . Pela Fig. 1, observa-se que o P_{80} do material fragmentado estava em torno

de 840 μm e aproximadamente 16% e 6% das partículas abaixo de 75 μm e 10 μm , respectivamente.

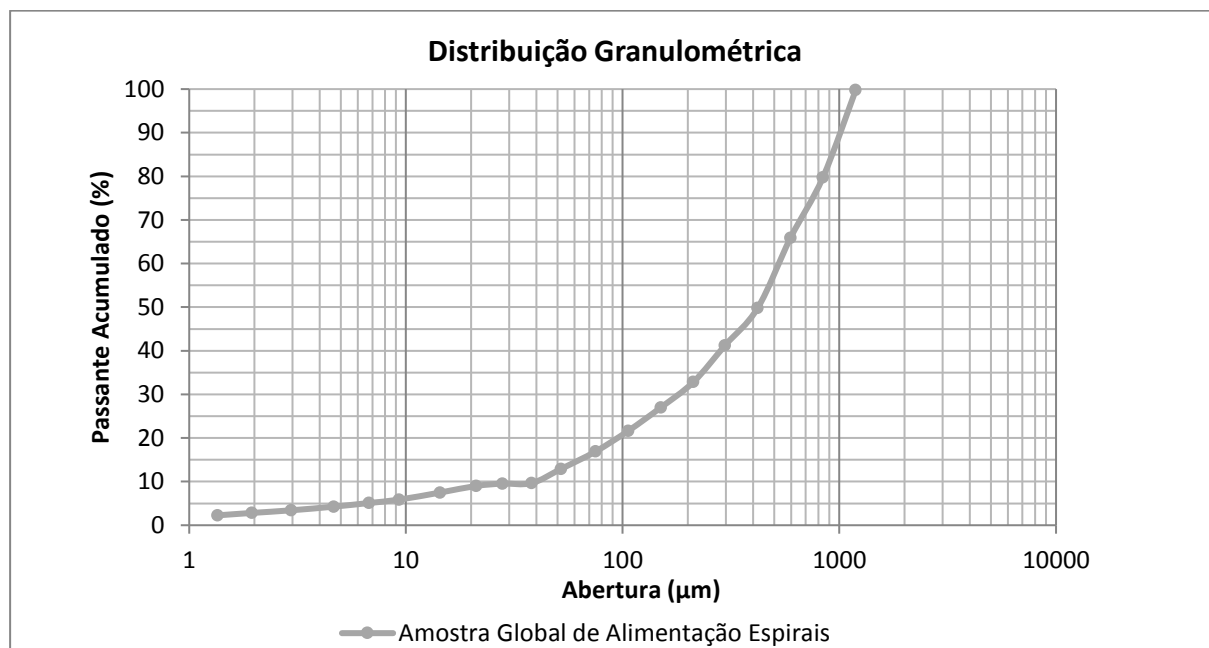


Figura 1. Distribuição granulométrica da amostra de rejeito de minério de ferro após a fragmentação.

A Tabela 1 apresenta a composição química da amostra global, determinada por titulometria e a perda por calcinação (PPC), determinada por termogravimetria no equipamento Q50 TA. Como pode ser observado na Tab. 1, o teor de Fe (30,4%) da amostra de rejeito está próximo dos teores de minérios de ferro (31 a 40% de Fe), que atualmente, já são processados no Quadrilátero Ferrífero (Lima *et al.*, 2011).

Tabela 1. Composição química e perda por calcinação (PPC) da amostra global de rejeito de minério de ferro.

Teores (%)					
Fe _{total}	SiO ₂	Mn	P	Al ₂ O ₃	PPC
30,35	50,36	0,19	0,132	2,1	3,03

Dauce *et al.* (2018), levando em consideração os teores dos elementos/compostos químicos e os minerais identificados na amostra de rejeito estudada, usando difratometria de raios X, análise termogravimétrica e microscopia ótica, estimou a proporção dos seguintes minerais: quartzo (47,9%), goethita (22,7%), caulinita (5,3%), apatita (0,7%) e 23,4% de outros (hematita, magnetita). O grau de liberação do quartzo, determinado por microscopia ótica, foi de 82% em 150 μm .

2.2 Ensaios de concentração em espiral de Humphreys

Todos os ensaios de concentração em espiral de *Humphreys* foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios do DEMIN/UFOP. O *software* Minitab 17 foi utilizado para o planejamento e análise dos experimentos. Os seguintes parâmetros foram investigados: granulometria (global e +75 μm) e percentual de sólidos (20 e 30%). As variáveis

respostas analisadas foram: recuperação em massa, recuperação de Fe e teores de Fe e SiO₂ nos concentrados obtidos.

O procedimento experimental dos ensaios de concentração na espiral de *Humphreys* (5 voltas) constou de preparação de uma polpa em um tanque de 70 litros no % de sólidos pré-determinado (20 ou 30%). Em seguida, a mesma foi alimentada na parte superior do equipamento por bombeamento. No final do equipamento (parte inferior da calha) foram coletadas simultaneamente amostras de concentrado e rejeito, que posteriormente foram filtradas, secadas, pesadas e preparadas para análises dos teores de Fe, SiO₂, Mn, P e Al₂O₃ por titulometria e de PPC por termogravimetria.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de concentração em espiral de *Humphreys* efetuados com a amostra de rejeito de circuito de concentração gravítica, em função dos parâmetros investigados (% de sólidos da polpa e granulometria da amostra). Como pode ser observado na Tab. 2, em geral o teor de Fe que era de ~30,4% na alimentação alcançou valores acima de 50% nos concentrados obtidos. O teor de SiO₂ reduziu aproximadamente 30%, saindo de um teor de ~50,4% da alimentação para valores em torno de 20%. Estes resultados são considerados satisfatórios para uma etapa de concentração *rougher*. As recuperações em massa e metálica ficaram em torno de 20 e 30%, respectivamente.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de concentração do rejeito de jigagem de minério de ferro em espiral de *Humphreys*.

Fatores				Teores (%)			
Percentual de sólidos (%)		Granulometria (µm)		Recuperação em massa (%)	Recuperação de Fe (%)	Teores (%)	
						Fe	SiO ₂
20	-	Global	-	21,95	42,05	54,45	17,28
30	+	Global	-	18,69	32,25	50,87	22,30
20	-	+75 µm	+	17,52	34,32	50,57	22,57
30	+	+75 µm	+	18,27	36,00	54,34	17,62
20	-	Global	-	17,95	32,04	52,01	20,74
30	+	Global	-	15,45	32,20	55,26	16,21
20	-	+75 µm	+	19,44	38,43	52,11	20,27
30	+	+75 µm	+	12,12	24,63	55,10	16,55

(-) nível inferior, (+) nível superior

Por definição, o critério de concentração (CC), definido por Taggart, que é utilizado para avaliar a facilidade de concentração de um determinado minério por métodos gravíticos, é dado pela Equação 1 (Luz *et al.*, 2010):

$$CC = (\rho_p - 1)/(\rho_l - 1) \quad (1)$$

Onde: ρ_p e ρ_l são as densidades dos minerais pesado e leve, respectivamente.

De acordo com Luz *et al.* (2010) valores de $CC > 2,5$, separação eficiente até 74 μm ; entre $2,5 > CC > 1,75$, separação eficiente até 147 μm ; $1,75 > CC > 1,50$, separação possível até 1,4mm, porém difícil e $1,7 > CC > 1,20$, separação possível até 6mm, porém difícil.

Levando em consideração as densidades dos principais minerais presentes na amostra de rejeito estudada (Deer *et al.*, 1992): hematita ($5,25\text{g/cm}^3$), goethita ($4,3\text{g/cm}^3$) e quartzo ($2,65\text{g/cm}^3$), pode-se inferir que o CC para separar a hematita do quartzo é de 2,57, indicando a possibilidade de concentração de partículas +75 μm . Para goethita e quartzo o CC é igual a 2, indicando a possibilidade de separação eficiente para partículas +147 μm . Segundo Araújo *et al.* (2003) a presença de goethita aluminosa e silicosa em espirais concentradoras, dependendo da massa específica e porosidade das mesmas, acabam por unir os fluxos de rejeito e concentrado, dificultando a separação seletiva entre a goethita e minerais de ganga (quartzo). Logo, os baixos valores de recuperação mássica e metalúrgica obtidos nos ensaios de concentração, efetuados neste trabalho, podem ser creditados ao elevado teor de goethita (aproximadamente 50% dos minerais de ferro) na amostra.

Considerando o grau de liberação de 82% em 150 μm , possivelmente o mesmo é inferior a 80% em granulometrias superiores, e isso também pode ter contribuído para perda de seletividade na espiral (aumento do % SiO_2 no concentrado e do % Fe no rejeito).

A Tabela 3 resume os efeitos e coeficientes estimados sobre a recuperação em massa, recuperação de Fe e teores de Fe e SiO_2 nos concentrados obtidos para um nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$). Observa-se que as variáveis granulometria da amostra (A) e percentual de sólidos da polpa (B), nos níveis estudados, não apresentaram efeito significativo sobre nenhuma das variáveis respostas analisadas, pois $p\text{-valor} > 0,05$.

Tabela 3. Efeitos e coeficientes estimados para recuperação em massa e metálica de Fe e teores de Fe e SiO_2 no concentrado.

Termo	Recuperação em massa (%)				Recuperação Fe (%)				Fe (%)				SiO ₂ (%)			
	Ef.	Coef.	p	sig	Ef.	Coef.	p	sig	Ef.	Coef.	p	sig	Ef.	Coef.	p	sig
Const.		18,0	0,00	S		48,7	0,00	S		53,1	0,00	S		19,2	0,00	S
A	0,4	0,21	0,60	N	2,6	1,28	0,50	N	-0,1	-0,06	0,93	N	0,1	0,06	0,95	N
B	-0,6	-0,32	0,43	N	-2,4	-1,18	0,53	N	1,6	0,80	0,29	N	-2,0	-1,02	0,33	N
A*B	-0,1	-0,04	0,92	N	-8,0	-3,98	0,08	N	1,8	0,89	0,25	N	-2,3	-1,15	0,29	N

S – Sim; N – não; Ef. – Efeito; Coef. – Coeficiente; Sig. – Significativo.

Na Figura 2 estão apresentados os gráficos dos efeitos principais para as variáveis respostas analisadas (recuperação mássica, recuperação de ferro, teor de Fe e teor de SiO_2) em função de cada parâmetro investigado isoladamente. Observa-se através das inclinações das retas que o percentual de sólidos teve maior influência sobre os resultados do que a granulometria. Isso indica que a presença de ~16% de partículas passantes em 75 μm e ~6% de partículas na fração de lama (-10 μm) na amostra global, não eram valores altos o suficiente para influenciar significativamente na eficiência da concentração, quando comparado com a amostra +75 μm .

O percentual de sólidos de 20% levou a maiores recuperações em massa e metálicas, sendo a última elevada de aproximadamente 31% para 37%, quando comparada com 30% de sólidos (ver Fig. 2). Sivamohan e Forssberg (1985) explicam que em concentradores espirais a recuperação máxima é obtida em baixas taxas de alimentação volumétrica e altos percentuais de sólidos, porém com o aumento da taxa de alimentação ocorre uma queda na recuperação, que é ainda mais significativa em percentuais de sólidos elevados. A elevada força centrífuga, devido a alta taxa de alimentação, faz com que partículas de finos densos e mistos, além das partículas leves, também sejam mantidas em suspensão. Aliado a isso, a alta percentagem de sólidos no fluxo intensifica as condições de sedimentação impedidas, e por isso há a redução da recuperação. Então, a taxa de alimentação usada nos ensaios deste trabalho, apesar de não ter sido medida, pode ter sido suficientemente alta para levar à redução na recuperação, mesmo em percentual de sólidos mais elevado.

Com relação aos teores (Fig. 2), verifica-se que com a elevação das recuperações em massa e metálica, ocorreu um leve aumento no teor de SiO_2 e redução no teor de Fe nos concentrados obtidos, o que era de se esperar, pois teores e recuperações metálicas são inversamente proporcionais.

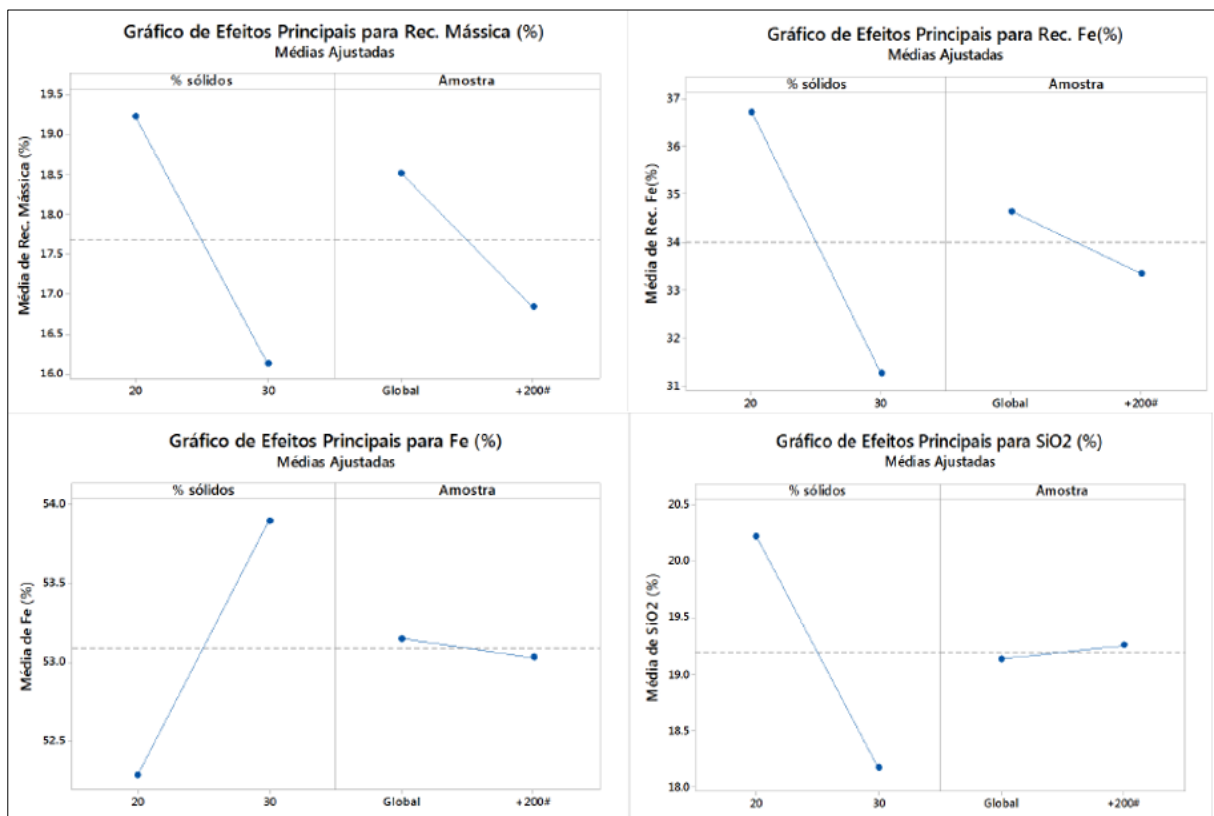


Figura 2. Gráficos de efeitos principais referentes a influência da porcentagem de sólidos e granulometria da amostra sobre a recuperação mássica e metálica de Fe, teores de Fe e SiO_2 .

Os gráficos de cubo com todas as condições testadas são apresentados na Figura 3. A recuperação mássica variou entre 15,2 e 19,9%, e as recuperações metálicas entre 30,3 e 36,4%, sendo esta a variável com maiores diferenças entre os resultados. Analisando os teores de Fe nota-se que esses valores ficaram próximos entre si, variando de 51,3 a 54,7% e no caso da SiO_2 os teores variaram de 17,1 a 21,4%. As melhores condições dos parâmetros testados

podem ser definidas como percentual de sólidos da polpa de 20% e granulometria global, pois favoreceram as recuperações em massa e metálica, alterando muito pouco os teores de SiO_2 e Fe nos concentrados obtidos. Como esperado para etapa *rougher* de concentração, o teor elevado de SiO_2 no concentrado indica a necessidade de posteriores etapas de limpeza, ou o *blending* deste material com produtos de altos teores para atender as especificações da indústria siderúrgica. Novas condições e parâmetros, a exemplo da taxa de alimentação, citada por Arenare *et al.* (2009) como a variável operacional primária de concentradores espirais, podem ser investigadas com o objetivo de aumentar a recuperação de Fe.

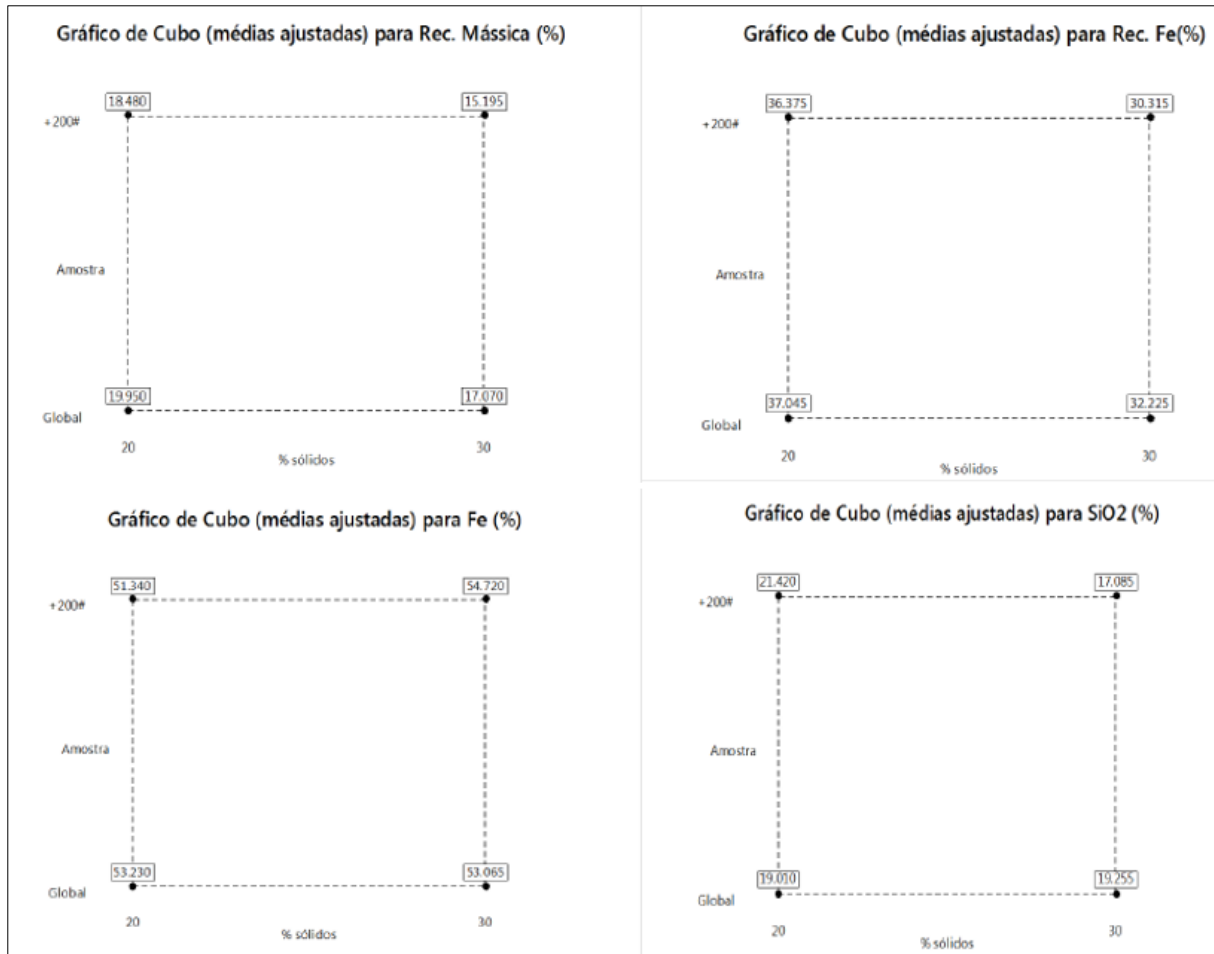


Figura 3. Gráficos de cubo referentes a influência da porcentagem de sólidos e granulometria da mostra sobre a recuperação mássica, recuperação de Fe, teores de Fe e SiO_2 .

4. CONCLUSÕES

Os parâmetros: percentual de sólidos na polpa e granulometria, nos níveis estudados, não apresentaram efeitos significativos sobre as variáveis respostas analisadas (recuperação mássica, recuperação de Fe, teores de Fe e SiO_2 nos concentrados obtidos). Porém, observou-se um aumento de aproximadamente 20% no teor de Fe em relação ao teor de 30,4% na alimentação. As condições que apresentaram os melhores resultados foram com o percentual de sólidos na polpa de 20% e amostra global. Nestas condições o concentrado obtido

apresentou teor de Fe de 53,2%, SiO₂ de 19,0%, recuperação mássica de 20% e recuperação de Fe de 37,1%.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Fapemig (PPM-00082-14) e UFOP (Auxílio pesquisador) pelo suporte financeiro. À empresa de mineração por fornecer a amostra de rejeito e análises químicas. Ao Instituto Superior Politécnico de Tete (Moçambique), em parceria com o Projeto Cinop (Holanda). Ao CNPq.

6. REFERÊNCIAS

Araújo AC, Amarante SC, Souza CC, Silva RRR. Ore mineralogy and its relevance for selection of concentration methods in processing of Brazilian iron ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy* 2003; 112(1); 54-64.

Arenare DS, Rodrigues OMS, Araujo AC, Viana PRM. Espirais concentradoras no tratamento de minérios de ferro: uma breve revisão. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração* 2009; 5(4);224-228.

Dause PD, Castro GB, Lima MMF, Lima RMF. Characterisation and magnetic concentration of an iron ore tailings. *Journal of Materials Research and Technology* 2018.

Deer WA, Howie RA, Zussman J. An introduction to the rock-forming minerals. 2a.ed. Churchill Livingstone USA: Logman; 1992.

Lima RMF, Lopes GM, Gontijo CF. Aspectos mineralógicos, físicos e químicos na flotação catiônica inversa de minérios de ferro de baixos teores, do Quadrilátero Ferrífero-MG. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração* 2011; 8(2); 126-131.

Luz AB, Sampaio JA, França, SCA. Tratamento de Minérios. 5ª. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCP; 2010. Chapter 7, Concentração gravítica, p.301-325.

Rabelo MN. Caracterização tecnológica do rejeito da planta de concentração de grossos de minério de ferro da Mina Lagoa das Flores. [Trabalho de Conclusão de Curso]. Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto; 2015.

Sivamohan R, Forsberg E. Principles of spiral concentration. *International Journal of Mineral Processing* 1985; 15; 173-181.